

УДК 550.34.01

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАК ПОДВИД ГРУППИРУЕМЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

© 2025 г. А. В. Дещеревский^{1, *}, А. А. Лукк^{1, **}

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: adeshere@ifz.ru

**E-mail: allukk@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.09.2023 г.

После доработки 09.03.2024 г.

Принята к публикации 11.03.2024 г.

Изучаются связанные в пространстве и времени линейные последовательности эпицентров землетрясений (“цепочки”). Предложен новый подход к пониманию цепочек землетрясений как особой разновидности групповых (кластеризованных) событий. Считается, что кластеры групповых землетрясений с высокой явно выраженной пространственной анизотропией потенциально представляют собой искомые цепочки. Таким цепочкам придается физический смысл маркеров активизируемых тектонических нарушений.

Разработан формализованный алгоритм выделения линейных последовательностей эпицентров землетрясений на основе предложенного подхода. Поиск цепочек ведется в каталоге групповых землетрясений. Предварительно из сейсмичности удаляются одиночные события (т.е. не входящие в кластеры). Для этого использован ранее разработанный алгоритм, ориентированный на выделение любых взаимосвязанных событий, а не только (преимущественно) афтершоковых и/или форшоковых серий [Дещеревский и др., 2016а].

Предложенный метод выделения цепочек землетрясений успешно апробирован на каталогах землетрясений Гарма, Ирана и центральной Турции. Приведены карты цепочек, обсуждаются сводные статистики поля цепочек. Как правило, эти цепочки можно сопоставить с различными тектоническими нарушениями, однако значительная их часть не привязана к известным структурам. Для Гармского района показана преэминентность полученных результатов с ранее выполненными исследованиями.

Как и почти любой метод анализа сейсмических данных, алгоритм построения цепочек землетрясений имеет значительное число настраиваемых параметров. В определенных пределах можно варьировать критерии выделения групповых событий, минимальное количество событий в цепочке и ее минимальную длину, а также требуемый уровень прямолинейности цепочки. Однако все эти настройки влияют прежде всего на общее количество обнаруженных в каталоге цепочек, а их расположение на местности и ориентация (азимуты) от настроек алгоритма почти не зависят. Это позволяет рассматривать предложенный метод анализа как принципиально новый способ извлечения и визуализации информации о пространственно-временной организации сейсмичности.

Более подробное изучение как самой структуры цепочек землетрясений, так и ее изменений во времени в различных сейсмоактивных регионах мира может способствовать лучшему пониманию динамики сейсмотектонического процесса.

Ключевые слова: связанные в пространстве и времени линейные последовательности эпицентров землетрясений (цепочки); групповые землетрясения; системы цепочек; алгоритмы анализа сейсмических каталогов.

DOI: 10.31857/S0002333725010048, EDN: ACQBNZ

1. ВВЕДЕНИЕ

Пространственно-временное распределение многочисленных слабых землетрясений не является случайным, поскольку в нем присутствуют такие явления, как афтершоковые последовательности, рои землетрясений и связанные в пространстве и времени линейные последовательности эпицентров землетрясений. Последние представляют для нас наибольший интерес, поскольку они, скорее всего, отражают структуру сетки активных тектонических разломов или, в общем виде, “сейсмической трещиноватости”. Выделение и анализ структуры таких цепочек дает независимый способ обнаружения таких структур.

Деформация, сопровождающаяся образованием разрывов сплошности материала Земли, должна локализоваться в узких зонах, толщина которых мала по сравнению с их линейными размерами — некий аналог линий Людерса [Белл, 1984; Костров, 1975]. Образование каждого нового разрыва сплошности реальной среды увеличивает ее неоднородность, что должно приводить к образованию некоторой “сетки” неоднородностей в виде тектонических контактов между блоками земной коры. Из механики разрушения известно, что такие контакты могут служить концентратами “быстрых” деформаций, реализуемых в скачкообразной реализации накопленной упругой энергии [Костров, Никитин, 1970; Введенская, 1973; Scholz, 2002].

При этом упругая часть деформации скачком переходит в неупругую деформацию. Этот переход может происходить и медленно в процессе вязкого или пластического течения. В этом смысле землетрясение — лишь одна из компонент тектонической деформации.

Поскольку сейсмичность является характеристикой динамической стадии процесса тектонических деформаций, следует ожидать, что в зонах быстрого перехода упругой части деформации в неупругую повышена вероятность возникновения связанных в пространстве и времени последовательностей землетрясений (цепочек землетрясений).

В качестве пионерских работ в признании возможности выявления таких цепочек можно указать на работу [Mogi, 1968], где приводятся примеры направленной миграции эпицентров сильных землетрясений; на серию работ по изучению подобной миграций вдоль Анатолийского разлома в Турции [Allen, 1969; Ambraseys, 1970;

и др.]; на серию исследований регулярной повторяемости сильных землетрясений в Паркфилде вдоль одной из ветвей знаменитого разлома Сан-Андреас в Калифорнии [Bakun, McEvilly, 1984; Segall et al., 1990; Wyss, 1990; и др.].

Впервые детальное изучение связанных в пространстве и времени линейных последовательностей эпицентров слабых землетрясений ($M = 1-4$) на базе их огромной статистики в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня на Гармском геодинамическом полигоне было осуществлено А.А. Лукком [Лукк, 1978]. Автором такие последовательности были названы “цепочками эпицентров землетрясений”. Реальность существования таких цепочек проверялась в дальнейшем путем сравнения выделенных последовательностей с аналогичными результатами для рандомизированной версии каталога [Лукк, Турчанинов, 1998].

Аналогичное понятие “цепочки эпицентров землетрясений” использовалось П.Н. Шебалиным как индикатора роста радиуса корреляции сейсмичности [Шебалин, 2005; 2011; 2020]. На ретроспективных данных в восьми сейсмоактивных регионах автором было показано, что цепочки могут рассматриваться как самостоятельный предвестник сильных землетрясений. Определение цепочек оказалось весьма стабильным, и результаты значимо отличались от случайного угадывания с высокой степенью надежности.

Идеи А.А. Лукка и П.Н. Шебалина были развиты в работе [Гусев, Палуева, 2016], в которой изучались структурные свойства поля эпицентров путем рассмотрения пар эпицентров-соседей на примере сейсмичности Камчатки. В этой работе были также развиты идеи П.Н. Шебалина относительно изучения пространственно-временного взаимодействия таких пар с целью выявления сетки разломов невысокого ранга.

Другая попытка развития метода была принята А.А. Лукком и В.И. Журавлевым, которые предложили методику выделения цепочек землетрясений на основе вычисления скалярных произведений векторов ближайших во времени пар сейсмических событий и определения общего направления выделенной последовательности. Несмотря на высокую комбинаторную сложность этого метода, а также ограничения, свойственные любым оконным подходам, метод позволил получить обнадеживающие результаты. К сожалению, эта работа осталась неза-

конченной; частично полученные результаты представлены в работе [Лукк, 2022].

Предпринимались также попытки изучения пространственной упорядоченности землетрясений в пределах сейсмогенных плоскостей с учетом глубин очагов сейсмических событий [Кролевец, Макеев, 2011; Макеев, Кролевец, 2012; Делемень, 2021]. При этом использовалась модель структурного строения среды, состоящей из блоков с плоскими границами, понимаемыми как тектонические разломы; предполагалось, что именно они могут выявляться по группированию в пространстве гипоцентров землетрясений. Подобное выделение плоскостей, на которых располагаются связанные в пространстве и времени гипоцентры землетрясений, предполагалось применить к областям возникновения глубоких подкорковых землетрясений. К нашему случаю, когда интервал глубин очагов землетрясений располагается в верхней половине земной коры, такой подход не применим из-за относительно высоких ошибок определения гипоцентров мелких землетрясений.

2. МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ЦЕПОЧЕК ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ОСНОВАННЫЙ НА АНАЛИЗЕ КЛАСТЕРОВ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ СОБЫТИЙ

2.1. Идея метода

Несмотря на кажущуюся простоту такого объекта, как линейно упорядоченная последовательность эпицентров землетрясений, поиск таких цепочек в реальном каталоге не является тривиальной задачей. Один из возможных подходов состоит в использовании скользящего временного окна, заданного фиксированным числом последовательных событий в каталоге [Лукк, 1978; 2022; Лукк, Турчанинов, 1998]. Несомненным достоинством этого метода является простота реализации, что было немаловажно в докомпьютерную эпоху. Однако он имеет и определенные недостатки. Так, если использовать окно небольшой ширины, то из анализа исключаются цепочки с большим числом событий. Если же увеличить число событий в окне, то в цепочку часто будут вклиниваться землетрясения, произошедшие на большом удалении друг от друга (на разных краях карты), не связанные физически. Это нарушит формальные требования к цепочке и помешает ее идентификации. Наконец, окно, заданное интервалом номеров событий в каталоге, может охватывать как очень маленький, так и очень большой промежуток

времени в зависимости от наличия сейсмического затишья и/или возникновения афтершоковых серий либо роев. Это значит, что ограничения на допустимый интервал времени между событиями будут совершенно различными для разных цепочек, что вряд ли оправданно.

В работах [Лукк, 1978; Лукк, Турчанинов, 1998] для проверки линейности цепочки проверялось попадание нескольких подряд идущих событий в некоторую полосу ограниченной ширины, ориентированную в заданном направлении. При этом накладывалось требование, чтобы линейная длина цепочки превышала определенный предел. Фактически в этом случае контролировалась величина отношения “длины” облака эпицентров к его “ширине”, что дает очевидный и наглядный критерий “вытянутости” (анизотропии) группы событий, формирующих цепочку.

Однако практическая реализация упомянутого выше подхода сталкивается с определенными техническими проблемами. Так, перебор возможных азимутов обычно проводится с некоторым фиксированным шагом [Лукк, Турчанинов, 1998], что неизбежно приводит к снижению точности детектирования цепочек, азимуты которых попадают на промежуточные значения. Во-вторых, при таком подходе необходимо заранее фиксировать ширину полосы, в которой проводится поиск цепочек. Это приводит к возможному пропуску цепочек большой длины (с большим расстоянием между эпицентрами). Ведь при большой длине цепочки условие ее прямолинейности может быть выполнено с достаточной точностью, несмотря на значительный разброс событий в перпендикулярном направлении.

Учитывая накопленный опыт, мы выделили две задачи, которые следовало решить при конструировании нового алгоритма обнаружения цепочек землетрясений и проверки их неслучайности. Во-первых, необходимо было усовершенствовать метод отбора “кандидатов в цепочки” так, чтобы он не зависел от выбора временного окна, наличия в каталоге посторонних событий и прочих обстоятельств, не имеющих непосредственного отношения к данной цепочке. Во-вторых, необходимо было предложить более робастную метрику, позволяющую оценивать прямолинейность цепочки отобранных эпицентров землетрясений простым и наглядным способом.

Как оказалось, обе эти задачи решаются совершенно естественным образом, если при построении цепочек событий опираться на физические (а не “кинетические”) соображения. А именно мы исходили из того, что причиной формирования цепочки является активизация некоторой сейсмогенной структуры. Такие землетрясения должны быть взаимосвязаны, то есть представлять собой часть групповых событий. Поэтому поиск цепочек необходимо вести не в полном каталоге исследуемого региона, а лишь среди пространственно ограниченных кластеров землетрясений.

Факт группирования (пространственно-временной кластеризации) землетрясений хорошо известен и не вызывает сомнений. Ранее были предложены множество моделей группирования землетрясений, позволяющих классифицировать любое событие в каталоге либо как групповое, либо как одиночное [Knopoff, 1964; Utsu, 1969; Savage, 1972; Gardner, Knopoff, 1974; Prozorov, Dziewonski, 1982; Reasenber, 1985; Прозоров, 1986; Кейлис-Борок, Кособоков, 1986; ; Frohlich, Davis, 1990; Молчан, Дмитриева, 1991; Ogata, Zhuang, 2006; Vecchio et al., 2008; Zaliapin et al., 2008; Смирнов, 2009; Console et al., 2010; Zhuang et al., 2011; Писаренко, Родкин, 2019]. Эти результаты дают возможность обоснованно отказаться от поиска кандидатов в цепочки в произвольно задаваемом пространственно-временном окне, скользящем по полному каталогу землетрясений, и перейти к анализу кластеров взаимодействующих событий, связь между которыми объективно обусловлена физическими процессами в земной коре и надежно подтверждается статистически.

С точки зрения рассматриваемой задачи определенным недостатком большинства вышеупомянутых моделей кластеризации сейсмичности является то обстоятельство, что приоритет отдается выделению афтершоковых серий. При поиске протяженных линейных структур ограничивать анализ только лишь афтершоковыми сериями нецелесообразно — лучше рассматривать вообще любые группы взаимодействующих событий без дополнительных ограничений. Метод выделения таких групп был предложен в работах [Мирзоев, 1980; 1988; Мирзоев, Азизова, 1983] и развит в работе [Дещеревский и др., 2016а]. В данной работе мы искали цепочки в кластерах землетрясений, выделенных указанным методом [Дещеревский и др., 2016а].

Таким образом, “кандидат в цепочку” в нашем случае представлен облаком эпицентров,

входящих в кластер, причем количество событий в кластере заранее неизвестно (и может быть довольно большим), а порядок их реализации, согласно нашей модели, не важен. Такая постановка естественным образом приводит к решению второй задачи. А именно для оценки прямолинейности “кандидата в цепочку” достаточно оценить степень вырожденности облака эпицентров, то есть сравнить его “длину” с “шириной”. При этом из соображений робастности было бы нежелательно использовать с этой целью какие-то экстремальные статистики, для расчета которых анализируются координаты “крайних” событий (т.е. эпицентров, наиболее удаленных от центра облака). Вместо этого целесообразно выбрать какую-то более устойчивую характеристику, не зависящую от ориентации облака и не так сильно меняющуюся при добавлении, удалении или смещении одного или нескольких эпицентров. В качестве такой меры линейности (вытянутости) облака мы приняли эксцентриситет облака эпицентров, вычисляемый через отношение большой и малой осей эллипса рассеяния эпицентров [Альшанский, 2021; Студопедия..., 2023].

Таким образом, предлагаемый метод поиска и анализ значимости линейных цепочек эпицентров землетрясений основан на трех следующих базовых принципах:

во-первых, поиск цепочек проводится не в полном каталоге, а лишь среди групповых (взаимодействующих) событий в терминологии [Дещеревский и др., 2016а];

во-вторых, считается, что каждый достаточно вытянутый кластер событий потенциально формирует одну квазилинейную цепочку землетрясений;

в-третьих, для каждого кластера-кандидата проверяется выполнение установленных критериев выделения цепочки и устанавливается факт ее существования, а также уточняются ее характеристики.

2.2. Выделение групповых событий

Процедура выделения групповых подробно событий описана в работе [Дещеревский и др., 2016а], поэтому напомним вкратце лишь ее основные идеи. Метод основан на подсчете обобщенных расстояний между событиями в пространстве, включающем две горизонтальные координаты и время (глубину гипоцентров мы решили пока не учитывать, так как она определяется ненадежно на малых глубинах в земной коре;

вместо этого мы ограничили рассмотрение приповерхностными событиями). К “кластерным” метод относит события, у которых есть близкий сосед в описанном обобщенном пространстве, к “одиночным” — те, у которых нет такого соседа.

Подчеркнем, что оба критических расстояния — $R_{кр}$ в пространстве и $T_{кр}$ во времени — не задаются исследователем, а оцениваются по сейсмическим данным. Для этого строятся две функции распределения расстояний R_{ij} между эпицентрами событий с каталожными номерами i и j .

Функция $Nx(R_{ij})$ строится для событий с $|i - j| \gg 1$. Считается, что такие события заведомо не принадлежат одному кластеру (на практике эти пары формируются из событий, принадлежащих первой и второй половине каталога). Эта функция показывает, на каких расстояниях R_{ij} друг от друга обычно происходят невзаимодействующие землетрясения. Заметим, что эта функция не может быть вычислена аналитически через размер региона из-за пространственной неоднородности поля эпицентров, поэтому ее необходимо оценивать.

Вторая функция $N_1(R_{ij})$ строится для последовательных (соседних по времени) событий, для которых $|i - j| = 1$. Считается, что значительная часть таких пар сформирована групповыми, или взаимосвязанными событиями, из-за чего функция $N_1(R)$ может отличаться от функции $Nx(R_{ij})$.

Затем вычисляется нормированное отношение N_1/Nx двух этих функций: $Nn(R) = N_1(R)/Nx(R)$. Как показывают расчеты [Дещеревский и др., 2016а], для большинства реальных каталогов функция $Nn(R)$ имеет очень характерный вид: при больших R она близка к 1, но при уменьшении R ниже некоторого критического значения $R_{кр}$, она очень резко (экспоненциально) растет. Отсюда можно сделать вывод, что события с $|i - j| = 1$, произошедшие на расстоянии $R > R_{кр}$, неотличимы от одиночных, т.е. они не взаимодействуют. В то же время при $R < R_{кр}$ функция $Nn(R)$ растет настолько стремительно, что если мы отнесем к кластерным *все* такие события, то лишь малая часть из них будет представлена “рассеянными” землетрясениями, случайно произошедшими в близкой окрестности друг от друга (предполагается, что одиночные землетрясения происходят в случайных местах в соответствии с плотностью облака эпицентров). Причем большинство из этих одиночных событий, ошибочно пропущенных критерием $R_{кр}$, затем отсеивается по критерию $T_{кр}$.

Расчеты показывают, что, несмотря на простоту и даже примитивность описанного подхо-

да, он позволяет исключительно четко разделить все события в каталоге на кластерные и одиночные. Для большинства каталогов, покрывающих относительно однородную территорию (Гарм, Иран, Нурек, Гарлок и др.), количество “пропусков цели” составляет доли процента, а количество “ложных тревог” — несколько процентов (поскольку для нас было важно не пропустить групповые события, мы выбрали указанный “несимметричный” компромисс между ними, варьируя параметр $Q_{R_{кр}}$, что позволяло уменьшить обе ошибки до 1% и менее). Поясним, что фактическое количество “пропусков цели” и “ложных срабатываний” вычисляется путем анализа функции $Nn(R)$ (см. обсуждение зон $M1$ и $M2$ на рис.11 из работы [Дещеревский и др., 2016а]).

Важно, что использованный алгоритм группирования содержит многочисленные инструменты “самоконтроля”. В частности, при вычислениях проверяется, что функция $Nn(R)$ монотонна, стабильно близка к 1 при больших R , и резко растет при малых R . Также проверяется количество пропусков цели и ложных срабатываний (в настоящей работе мы задали для них пороги 1% и 5%). Если любое из этих требований не выполняется, то алгоритм расценивает это как фатальное нарушение предложенной модели группирования, и делается вывод о невозможности разделения такого каталога на групповые и “одиночные” землетрясения предложенным методом [Дещеревский и др., 2016а].

Энергия землетрясений при вычислениях не учитывается, но предварительный отбор только представительных землетрясений необходим, чтобы обеспечить однородность каталога¹. Обоснованность такого подхода подтверждается тем фактом, что, согласно работе [Дещеревский и др., 2016а], оцениваемый радиус группирования $R_{кр}$ от энергии землетрясений практически не зависит. С физической точки зрения такой результат допускает разумную интерпретацию, если предположить, что кластеризация характеризует в первую очередь саму геофизическую среду, а не сейсмический процесс. Несмотря на кажущееся противоречие с общепринятыми подходами к группированию, такое предположение представляется достаточно правдоподобным, если учесть, что энергетика сейсмического процесса составляет лишь незначительную долю от общей энергии, рассеиваемой в земной коре

¹ Для имеющихся в каталоге непредставительных событий при необходимости может быть проведена проверка на их возможную принадлежность к тем кластерам, которые сформированы представительными событиями.

[Гутенберг, Рихтер, 1948; Кузьмин, 2015; 2019; 2022], и, следовательно, первичны именно тектонические процессы, а наблюдаемая сейсмичность является лишь их отголоском.

2.3. Формализация алгоритма поиска цепочек и выбор (настройка) свободных параметров метода

При практической реализации любых расчетов всегда возникает вопрос о свободных параметрах алгоритма, так как результаты обычно сильно зависят от оптимального выбора этих настроек. Поскольку предложенный алгоритм опробовался впервые, мы были вынуждены опираться на априорно заданные критерии этой оптимизации. А именно мы стремились построить наиболее детализированное поле относительно прямолинейных цепочек, которое бы максимально объективно характеризовало исследуемый каталог. Такой подход к настройке параметров алгоритма небезупречен с теоретической точки зрения, однако он является обычной практикой в любых статистических исследованиях реальных данных

При проектировании алгоритма мы разбили процедуру верификации на пять шагов, включив в алгоритм соответствующие настройки:

1. Проверка числа событий, входящих в цепочку

В рамках предложенного подхода нет никакой необходимости как-то фиксировать максимальное количество событий в цепочке — оно определяется прежде всего объемом и структурой исходного кластера. Однако вопрос об ограничении минимального количества событий в цепочке менее очевиден.

При выделении групповых событий считается, что кластер может состоять всего лишь из двух событий, произошедших на небольшом расстоянии друг от друга во времени и в пространстве. Тем не менее мы сразу исключили из рассмотрения такие кластеры, так как для них невозможно оценить “неслучайность” цепочки, поскольку через два эпицентра всегда можно провести “идеальную” прямую. Разумеется, определенная информация о преобладающем простирании линейных структур может быть получена и при анализе азимутов, связывающих пары событий. Как показывают расчеты, распределение таких азимутов обычно выглядит неслучайным и часто допускает разумную физическую интерпретацию [Шебалин, 2005; Гусев, Палуева, 2016]. Однако в этом случае единственным методом проверки достоверности результата фактически

является сам этот результат. Мы же хотели иметь дополнительный независимый критерий, показывающий, что случайное объединение событий в такую квазилинейную цепочку маловероятно. Но такой критерий будет не очень надежным даже при наличии трех событий в цепочке, так как случайное смещение всего лишь одного из трех эпицентров может приводить к резкому изменению критической статистики. Поэтому из соображений устойчивости мы рассматривали только цепочки, содержащие не менее четырех событий.

Заметим, что увеличение требуемого числа событий в цепочке хотя бы до 5 шт. могло бы еще сильнее повысить устойчивость результатов, однако в этом случае количество выделенных цепочек резко уменьшится. Дело в том, что основная масса кластеров взаимосвязанных землетрясений в рассматриваемых нами каталогах содержит всего лишь несколько событий (обычно менее 10, см. рис. 3), и только в исключительных случаях их там десятки и сотни штук [Дещеревский и др., 2016а].

2. Проверка эксцентриситета исходного кластера

Вторым свободным параметром метода является минимально допустимый эксцентриситет исходного кластера. Цель этого ограничения состоит в отбраковке излишне округлых (изометричных) кластеров, которые явно не ассоциируются с линейной цепочкой. Заметим также, что описанная ниже очистка кластера от событий-помех (см. ниже шаг 5) оправдана лишь в том случае, если кластер, изначально достаточно вытянутый, имеет явно преобладающее направление. В противном случае такая очистка может приводить к неустойчивым результатам.

Для расчетов мы приняли значение минимального эксцентриситета 0.5, так как меньшие значения использовать недопустимо по описанным выше причинам. Однако в ходе расчетов выяснилось, что введенное ограничение является скорее формальным и практически не влияет на результаты. Дело в том, что для подавляющего большинства кластеров-кандидатов их эксцентриситет изначально превосходит это значение. Если же исходный кластер имеет низкий эксцентриситет, то даже после выбраковки отдельных событий-помех, с учетом ограничения на их предельное количество (см. шаг 5), целевой эксцентриситет (см. шаг 4) все равно достигнут не будет. Таким образом, данный параметр, по-видимому, является избыточным.

3. Проверка длины (линейного размера) цепочки

Как известно, координаты эпицентров в каталоге всегда определяются с некоторой погрешностью Δ (фактически эта погрешность также является настраиваемым параметром алгоритма). Для надежной идентификации цепочки, а также для уверенного определения ее азимута необходимо, чтобы линейная протяженность цепочки многократно превышала погрешность Δ . В данной работе мы приняли требование, что длина большой оси [Альшанский, 2021; Студопедия..., 2023] облака эпицентров должна быть больше или равна 4Δ . В противном случае кластер бракуется (цепочка не строится). Данная проверка сразу отсекает все кластеры, состоящие из близко расположенных событий.

4. Проверка эксцентриситета кластера, очищенного от событий-помех

Для перекалфикации кластера событий в цепочку мы приняли условие, что его эксцентриситет должен быть не менее 0.90. Если это условие не выполняется, то программа переходит к шагу 5.

5. Очистка кластера от событий-помех

Мы исходили из того, что в силу разных причин кластер может быть засорен небольшим процентом “посторонних” событий, лежащих в стороне от линеамента. Для более четкого выявления цепочки такие события целесообразно убрать каким-либо формализованным способом. Последний параметр алгоритма ограничивает максимальное количество этих “событий-помех”. В данной работе мы приняли, что такая очистка должна сохранять в кластере не менее 80% событий от его изначального состава с округлением в большую сторону. В частности, в кластере с начальным размером 5–9 событий может быть отбраковано не более одного события, и т.д.

Если разрешенное число событий-помех уже отбраковано, а эксцентриситет кластера все еще недостаточен, то кластер бракуется целиком. В противном случае программа отбраковывает “наиболее посторонний” эпицентр и возвращается на шаг 3.

Заметим, что для выбора “наихудшего” события мы использовали не отклонение данных от линии регрессии [Выбросы..., 2017], а специально разработанный полуэмпирический критерий, основанный на угловой мере. А именно выбраковывалось событие с максимальным

(по модулю) углом между главной осью цепочки и направлением из центра тяжести группы на этот эпицентр. Этот подход имеет явные преимущества в условиях заметной (по сравнению с размером цепочки) погрешности определения координат эпицентров, а кроме того, гарантирует, что удаленные от центра события, которые наиболее сильно влияют на ориентацию кластера, будут удаляться реже, чем более близкие к центру. Это предотвращает сокращение линейного размера цепочки (что повлекло бы выбраковку кластера целиком), а также способствует более наглядной визуализации цепочки на карте.

Таким образом, алгоритм поиска цепочек содержит пять настраиваемых (свободных) параметров, которые, однако, на практике могут варьироваться лишь в достаточно ограниченной степени. Обсудим подробнее наиболее спорный шаг предложенного алгоритма, связанный с выбраковкой событий-помех. Понятно, что злоупотребление такой чисткой потенциально может привести к произволу в получаемых результатах. Ведь если мы будем действовать подобно скульптору, который, отсекая лишнее, создает из глыбы мрамора любую фигуру, не сформируем ли мы таким образом ложные (искусственные) цепочки?

Чтобы исключить подобную ситуацию, мы, во-первых, ограничили предельное количество событий-помех (удалить можно менее 1/5 от всех событий) и, во-вторых, потребовали, чтобы потенциальные кандидаты в цепочку с самого начала имели достаточно высокий эксцентриситет (шаг 2). Такое ограничение обеспечивается предсказуемость и устойчивость процедуры очистки. Фактически мы работаем лишь с теми “кусками мрамора”, в которых целевая фигура просматривается изначально.

Но главным аргументом, оправдывающим правомочность такой операции, является тот факт (для авторов он оказался весьма неожиданным), что у большинства кластеров эксцентриситет изначально превышает пороговое значение 0.90, либо же достигает его при удалении единственного эпицентра (т.е. предельный порог чистки достигается достаточно редко). Более того, повышение целевого эксцентриситета с 0.90 до 0.95 отсеивает лишь около четверти кластеров-кандидатов (так, в Гармском каталоге число цепочек при этом уменьшается с 456 до 357). Фактически большинство кластеров изначально являются вырожденными. Присутствие в кластере событий-помех является скорее

исключением, чем правилом, а их выбраковку (в том случае, когда они есть) можно рассматривать как своего рода генерализацию данных, уменьшающую “визуальный шум” при графическом отображении цепочки землетрясений.

3. ТЕСТИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА НА СИНТЕТИЧЕСКИХ И ЗАШУМЛЕННЫХ КАТАЛОГАХ

Возникает вопрос о том, насколько часто такие цепочки землетрясений могут формироваться за счет спонтанной группировки хаотично расположенных эпицентров в вытянутые кластеры. Ведь в каталоге большого объема неизбежно будут возникать самые разные конфигурации эпицентров. Для оценки возможного количества таких артефактов мы обработали несколько синтетических каталогов.

Заметим, однако, что вопрос о методике построения подходящего для тестов каталога не так прост. Для примера рассмотрим каталог с совершенно случайными координатами и временами событий. Вполне очевидно, что для такого каталога самопроизвольное формирование функции $Nn(R)$, удовлетворяющей описанным выше требованиям, практически невозможно. Для этого необходимо явное и существенное отклонение плотности распределения эпицентров в обобщенном трехмерном пространстве от равномерной. Причем такая флуктуация должна охватывать заметную часть событий в каталоге — не менее 10–20%. Вероятность такой “макрофлуктуации” ничтожна уже для каталогов, насчитывающих несколько тысяч событий, и она быстро падает по мере роста объема каталога. На практике при обработке случайного каталога большого объема наш метод почти гарантированно покажет отсутствие кластеров, а следовательно, и цепочек.

Если же рассматривается каталог минимального размера (несколько сотен событий), то выделение кластеров (и цепочек) чаще всего становится невозможным из-за высокой статистической погрешности оценивания функции $Nn(R)$ и/или нарушения условия ее монотонности.

Но даже если в чисто случайном каталоге все-таки будут обнаружены какие-то “кластеры”, это еще не означает, что алгоритм сформирует из них “цепочки”, так как для этого необходимо выполнение перечисленных выше требований по линейному размеру облака эпицентров и его эксцентриситету. Два эти условия уменьшают количество цепочек, которые потенциально

могут быть обнаружены в квазислучайном каталоге, еще приблизительно на порядок.

Как видно из сказанного, тестирование метода на обычном случайном каталоге в нашем случае совершенно бессмысленно и бесполезно, так как цепочки в таком каталоге просто не обнаруживаются (что подтверждается численными экспериментами). Грубые теоретические оценки показывают, что для абсолютно случайного каталога, аналогичного Гармскому, но с равномерным распределением эпицентров во времени и в пространстве, вероятность самопроизвольного появления хотя бы одной “цепочки” не превосходит триллионных долей процента.

С другой стороны, столь же малоинформативным было бы и тестирование метода на синтетическом каталоге, построенном с включением афтершоковых серий, приуроченных к линейным разломным зонам. Ведь если в модельный каталог изначально заложены те структуры, которые в точности отвечают критериям поиска, то именно они и будут найдены при тестировании.

С учетом этого выполненные нами методические численные эксперименты заключались в анализе нескольких синтетических каталогов. Все они строились на основе Гармского каталога представительных землетрясений, который анализируется ниже (см. рис. 1 и рис. 4), с искусственно привнесенной рандомизацией отдельных параметров.

Во-первых, обрабатывался псевдослучайный каталог с теми же временами событий (что сохраняет группирование во времени), но рандомизированными координатами эпицентров.

Во-вторых, обрабатывался псевдослучайный каталог с теми же координатами событий (группирование в пространстве), но с перемешанными временами событий.

В-третьих, было обработано несколько вариантов каталога с зашумлением координат эпицентров. Для этого к широте и долготе каждого события добавлялся случайный шум с гауссовым распределением и известной дисперсией.

Процедура расчетов во всех случаях в точности соответствовала описанной выше процедуре для реальных каталогов. То есть сначала оценивались параметры группирования, а затем выделялись кластеры взаимодействующих событий, после чего проводился поиск цепочек землетрясений.

Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1. Количество кластеров и цепочек для синтетических и зашумленных каталогов

Вариант каталога	$R_{кр}$, км	$T_{кр}$, ч	Число групп, всего	Забраковано: мало событий в группе	Число групп с $N \geq 4$	Забраковано: слишком компактная группа	Число групп с $L > 4\sigma^*$	Забраковано: слишком мал эксцентриситет	Число цепочек
Рандомизированный каталог									
Равномерное распределение эпицентров в пространстве	—	—	0 ¹		0		0		0
Случайно перемешаны времена событий	—	—	0 ¹		0		0		0
Зашумление координат (наложен гауссов шум со стандартным отклонением σ)									
$\sigma = 4$ км	23	12	7340	5656	1684	561	1123	308	815
$\sigma = 8$ км	30	8	7273	5640	1633	70	1563	597	966
$\sigma = 16$ км	31	9	6713	5415	1298	11	1287	512	775
$\sigma = 32$ км	16 ²	66 ²	5885 ²	4995	890	163	727	196	531
$\sigma = 48$ км	7 ²	777 ²	4946 ²	4305	641	614	27	1	26
$\sigma = 64$ км	—	—	0 ¹		0		0		0

Примечания: * L – длина главной оси эллипса рассеяния; ¹цепочки отсутствуют, так как алгоритм выделения групповых событий не показывает наличие четкой границы между “кластерной” и “рассеянной” сейсмичностью согласно критериям в работе [Дещеревский и др., 2016а]; ²согласно дополнительным критериям самосогласованности алгоритма, параметры группирования оцениваются ненадежно.

Как видно из таблицы, рандомизация координат эпицентров приводит к тому, что алгоритм выделения взаимосвязанных землетрясений [Дещеревский и др., 2016а] уверенно диагностирует полное отсутствие кластеров (функция $Nn(R)$ равна единице при любых R). Соответственно, цепочки в таком каталоге отсутствуют вовсе.

Аналогичная ситуация наблюдается для каталога с рандомизированными временами событий. Несмотря на неоднородность пространственного распределения эпицентров, группирование, близкое по смыслу работе [Дещеревский и др., 2016а], в таком каталоге тоже отсутствует, так как соседние и удаленные по времени землетрясения находятся на одинаковых линейных расстояниях в статистическом смысле, и функция $Nn(R)$ вновь неотличима от единицы.

Значительно более интересные результаты получаются при использовании каталога со сдвинутыми координатами. Напомним, что

при наложении гауссова шума лишь треть эпицентров смещается на расстояние, превосходящее σ . Пока величина σ меньше, чем большая ось кластера, основная часть входивших в него эпицентров все-таки остается в пределах достаточно компактной “зоны взаимодействия”, т.е. в среднем они расположены гораздо ближе друг к другу, чем произвольные события в каталоге. Поэтому такой кластер в большинстве случаев все еще может быть идентифицирован алгоритмом [Дещеревский и др., 2016а], с последующим возможным выделением цепочки событий. В то же время при сильном “размазывании” кластера его эксцентриситет уменьшается, что может привести к его выбраковке.

Как видно из табл. 1, при минимальном зашумлении ($\sigma = 4$ и 8 км) количество выделенных цепочек не уменьшается, а увеличивается по сравнению с исходным каталогом. Это происходит из-за того, что линейный размер обнаруженных кластеров (которые в большинстве случаев примерно соответствуют кластерам

исходного каталога) увеличивается из-за рассеивания эпицентров. В результате излишне компактные кластеры, которые первоначально отбраковывались по критерию $L < 4\sigma$, перестают отбраковываться и продуцируют дополнительные цепочки.

Лишь при увеличении амплитуды шума до ± 16 км количество обнаруженных кластеров (включая кластеры малого размера из 2–3 событий) начинает существенно уменьшаться. Одновременно происходит уменьшение количества событий в кластере, так как такое зашумление уже выбрасывает некоторые эпицентры за пределы “зоны взаимодействия”. Из-за этого количество кластеров, содержащих 4 события и более, уменьшается до 1298. Кроме того, “размазывание” облака эпицентров приводит к уменьшению анизотропии кластеров, в результате чего все больший процент кластеров перестает удовлетворять критерию эксцентриситета. Если для незашумленного каталога достаточная анизотропия наблюдается в 79% случаев (476 кластеров из 606), то при зашумлении с амплитудой ± 16 км этот процент падает до 60% (775 кластеров из 1287). Этот результат подтверждает, что анизотропия (вытянутость) кластеров в реальном каталоге — это объективное свойство сейсмичности, а вовсе не кажущийся эффект, возникающий благодаря удалению “посторонних” событий.

При увеличении амплитуды шума до ± 32 км эффект “размытия” групп еще более усиливается, что приводит к аномалиям формы функции $Nn(R)$. Хотя она все еще сохраняет монотонность и требуемую асимптотику на малых и больших R , количество “пропусков цели” и “ложных тревог” в этом случае резко выходит за обычные рамки, что, согласно критериям алгоритма, может свидетельствовать о недостаточно четкой дифференциации событий в каталоге на “групповые” и “одиночные” (заметим, что при обработке реального каталога он был бы в этом случае забракован, однако здесь мы привели эти данные в методических целях). В табл. 1 указанный эффект находит свое отражение в виде резкого падения значений $R_{кр}$ по сравнению с менее зашумленными каталогами. Это вполне естественный результат — из-за рассеивания эпицентров в пространстве определенная часть кластерных событий “улетает” на значительное расстояние, и они становятся неотличимы от одиночных. В такой ситуации алгоритм сохраняет способность идентифицировать лишь отдельные наиболее мощные (изначально)

кластеры, для которых даже после рассеивания координат достаточное число событий все еще расположено в относительной близости друг от друга. Однако количество таких кластеров быстро падает по мере усиления шума; одновременно уменьшается их линейный размер. Это приводит к тому, что количество выделенных цепочек быстро снижается и при зашумлении с амплитудой ± 48 км становится незначительным. В этой связи стоит заметить, что, согласно рис. 5б, длина большинства цепочек (точнее, больших осей эллипса рассеяния) в исходном (незашумленном) каталоге не превышает 30 км. Поэтому совершенно естественно, что зашумление координат с амплитудой, превосходящей эту величину, приводит к исчезновению цепочек, сформированных из таких кластеров.

Наконец, при амплитуде шума ± 64 км рассеивание эпицентров увеличивается настолько, что разница в расстоянии между эпицентрами соседних и удаленных по времени землетрясений становится статистически незначимой для любых расстояний (функция $Nn(R) = 1$ при любых R). Согласно работе [Дещеревский и др., 2016а], это означает, что в каталоге невозможно выделить подкласс взаимодействующих событий, которые по своим статистическим характеристикам можно обособить от остальных, “одиночных” землетрясений. Соответственно, число обнаруженных цепочек при таком или более сильном рассеянии становится равным нулю.

Таким образом, численное моделирование показывает, что количество обнаруживаемых цепочек закономерно и объяснимо изменяется по мере зашумления координат эпицентров. В целом, несмотря на ограниченный характер выполненных тестов, можно сделать вывод, что алгоритм работает в соответствии с ожиданиями и что обнаруженные цепочки событий в реальном каталоге не являются статистическими артефактами, а отражают реальную структуру сейсмичности, которая действительно формирует кластеры взаимодействующих событий, форма которых тяготеет к квазилинейной.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ГАРМСКОГО РАЙОНА

4.1. Подготовка исходных данных для анализа: обреза периферии и выбор минимального энергетического класса

Условием применимости метода из работы [Дещеревский и др., 2016а] является однородность сейсмичности в пределах рассматри-

ваемого региона; кроме того, каталог должен содержать только представительные события. Однако у большинства реальных каталогов землетрясений представительность лучше в центральной части региона и ухудшается по его краям. Поэтому при анализе более обширной территории приходится увеличивать пороговую магнитуду M_c , что ведет к исключению из анализа более слабых событий, которые регистрируются без пропусков в центральной части района. Этот эффект приводит к контринтуитивной зависимости количества выделяемых кластеров от размера изучаемой территории: чем более обширный регион мы рассматриваем, уходя за пределы регистрирующей сети станций, тем меньше кластеров будет в нем обнаружено, так как для соблюдения условия представительности нам придется повышать минимальный энергетический класс используемых землетрясений.

Таким образом, для эффективного обнаружения цепочек землетрясений предлагаемым здесь методом необходим выбор оптимального компромисса между размером региона и значением представительной магнитуды M_c . Выбор минимального значения M_c позволяет наиболее детально изучить цепочки событий в центральной части исследуемого региона, окруженной регистрирующими станциями, где такое значение M_c обеспечено. Снижение требований к M_c позволяет расширить изучаемую территорию за счет исключения из анализа тех цепочек, в состав которых входят события с $M < M_c$.

Исходя из указанных требований и с учетом реальной представительности Гармского каталога землетрясений на разных участках мы пришли к выводу о целесообразности использования региона непрямоугольной формы, приведенной на рис. 1. Ниже мы будем использовать принятую в Гармском каталоге землетрясений энергетическую классификацию по величинам логарифма энергии — K . Напомним, что $K = 4 + 1.8M$, где M — локальная магнитуда [Раутиан, 1960].

Выборка землетрясений в пределах указанной на рис. 1 рамки в центральной части Гармского полигона сохраняет в каталоге 87731 событие из 93031. Соответствующий график повторяемости приведен на рис. 2. Уравнение для линейной части графика повторяемости имеет вид:

$$\text{Log}(N) = -0.49 \cdot K + 6.72. \quad (1)$$

Заметим, что при оценке параметров регрессии (1) мы не отсекали наиболее сильные события, как это рекомендуется делать в работе

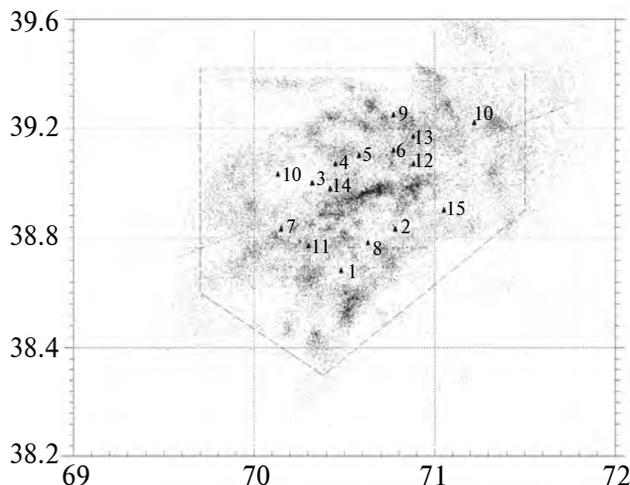


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Гармского района с $K \geq 6.1$ с указанием рамки центральной части, в пределах которой выделялись цепочки эпицентров землетрясений. Наблюдаемая на графике прямая линия, образованная упорядоченными точками эпицентров, маркирует положение уступа низкоскоростного пласта осадочных пород до глубины 8 км в южной половине района, принятого в скоростной модели среды, используемой при расчете эпицентров землетрясений Гармского района.

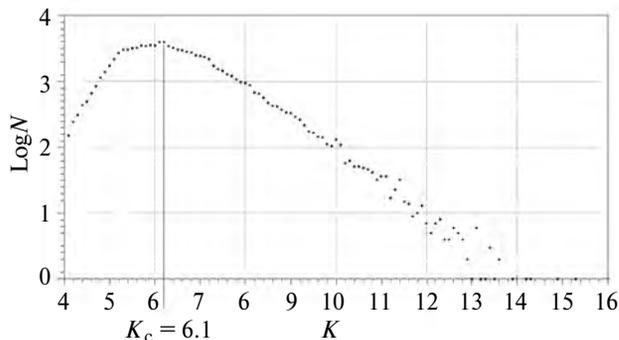


Рис. 2. График повторяемости землетрясений в пределах центральной части Гармского района K_c — представительный энергетический класс землетрясений.

[Писаренко и др., 2023], так как график повторяемости не имеет явных аномалий в области максимальных магнитуд.

С точки зрения используемой здесь методики анализа наиболее критичен процент потерянных событий с $K \geq K_c$ (такие события могут присутствовать на окраинах полигона, где фактическая представительность чуть хуже средней по региону). Оценки показывают, что при выборе порогового значения $K_c = 6.0$ на окраинах выбранной рамки может быть пропущена значительная часть произошедших там событий (десятки процентов). Поэтому мы остановились на значении

$K_c = 6.1$. Такой выбор оставляет в каталоге 46583 события, при этом доля пропущенных событий с $K \geq K_c$ даже на крайней периферии не превышает 20%.

4.2. Выделение групповых землетрясений

Как показали выполненные здесь расчеты, оптимальное значение $R_{кр}$, разграничивающее взаимосвязанные и невзаимодействующие события, равно 17 км, а критическое время $T_{кр} = 25$ ч, что идеально согласуется с результатами в работе [Дещеревский и др., 2016а], полученными в заметно более широкой рамке. Проведенный анализ позволил отнести к групповым 25771 событие, что составляет около 55% от всех землетрясений в рассмотренном каталоге.

На рис. 3 приведен график распределения числа выделенных групп по количеству групповых землетрясений в них. Интересно, что для групп с числом событий менее 50 наблюдается идеальная лог-линейная зависимость с коэффициентом 2.85. Однако наиболее мощные афтершоковые серии, образовавшие группы с числом событий более 50 (выбранный масштаб рисунка не позволил их показать) уже не столь хорошо удовлетворяют этой зависимости. Очень похожая закономерность (т.е. избыток сверхбольших групп) наблюдается и в других рассмотренных ниже каталогах.

Карта полученных таким образом групповых событий в центральной части Гармского района, по которым проводилось построение цепочек, приведена на рис. 4.

4.3. Выделение цепочек событий

Одним из свободных параметров алгоритма является погрешность определения координат эпицентров (Δ). Для Гарма мы приняли значение $\Delta = 4$ км. Заметим, что в работах [Лукк и др., 1973; Весон и др., 1976; Попандопуло, 1983; 1991; Рулев, 1991; Автоматизированная обработка..., 1991; Шевченко и др., 2017] среднеквадратичная ошибка координат эпицентров землетрясений оценивается как $\pm 2-3$ км. Однако реальные ошибки всегда выше, чем те оценки, которые получены на основании критериев внутренней сходимости метода [Дещеревский и др., 2016б; Дещеревский, Сидорин, 2021а; 2021б]. Для Гармского каталога землетрясений этот факт надежно подтверждается результатами сравнения двух способов оценки координат эпицентров [Дещеревская, Сидорин, 2010]. Принятое нами для расчетов значение учитывает это обстоятельство и ближе к реально возможной ошибке.

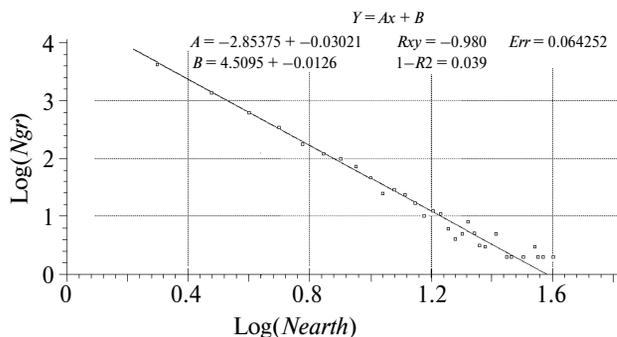


Рис. 3. Зависимость логарифма числа групп от логарифма количества событий в группе. На рисунке не показаны четыре наиболее мощных кластера с числом событий 132, 133, 138 и 723, сформированные афтершоковыми сериями крупнейших землетрясений, для которых лог-линейная зависимость нарушается.

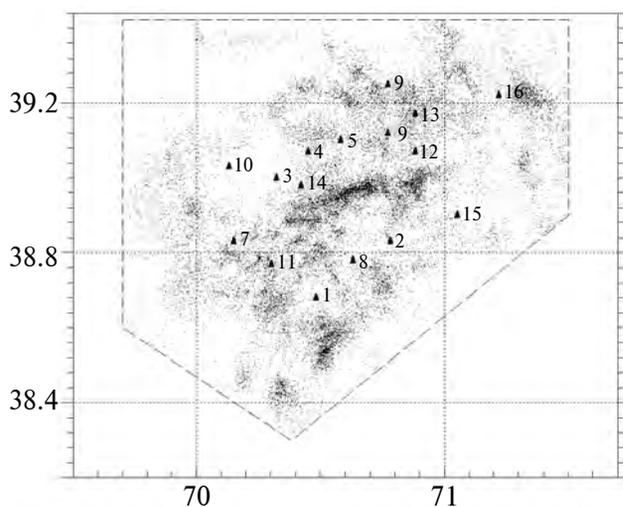


Рис. 4. Карта групповых событий в центральной части Гармского района.

Обработка каталога землетрясений Гармского района по описанному алгоритму позволила найти в нем 476 цепочек землетрясений, удовлетворяющих всем необходимым критериям. Обсудим статистику выделенных цепочек.

На рис. 5а приведено распределение количества событий в цепочках, а на рис. 5б — распределение длин цепочек. Напомним, что цепочки с числом событий 3 и менее мы не рассматривали. Оказалось, что 41% всех цепочек состоят из 4 событий, 34% цепочек состоят из 5 или 6 событий, 12.5% цепочек состоят из 7 или 8 событий, 5.5% цепочек состоят из 9–10 событий. И лишь в 1.7% случаев число событий в цепочке более 10.

Длина большой оси эллипса эпицентров для большинства цепочек ($\approx 61\%$) составляет 17–24 км. Лишь примерно в 2% случаев она

достигает 37–44 км. Более длинных цепочек в каталоге не оказалось. Напомним, что минимальный размер большой оси эллипса был задан равным $4\Delta = 16$ км, поэтому более короткие цепочки не строились.

Карта выделенных цепочек из групповых землетрясений с $K \geq 6.1$ в центральной части Гармского района для различных этапов времени показана на рис. 6.

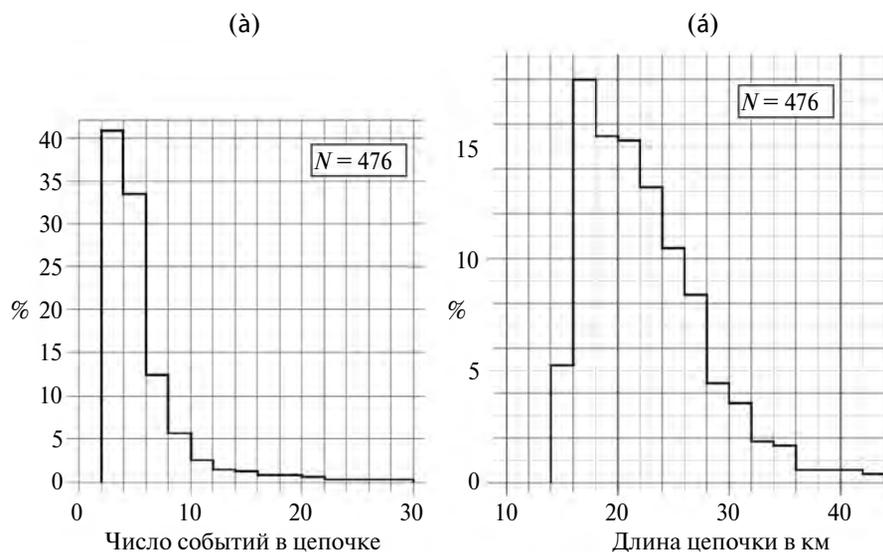


Рис. 5. Распределения чисел событий в цепочках (а) и длин больших осей эллипса рассеяния событий в цепочках (б).

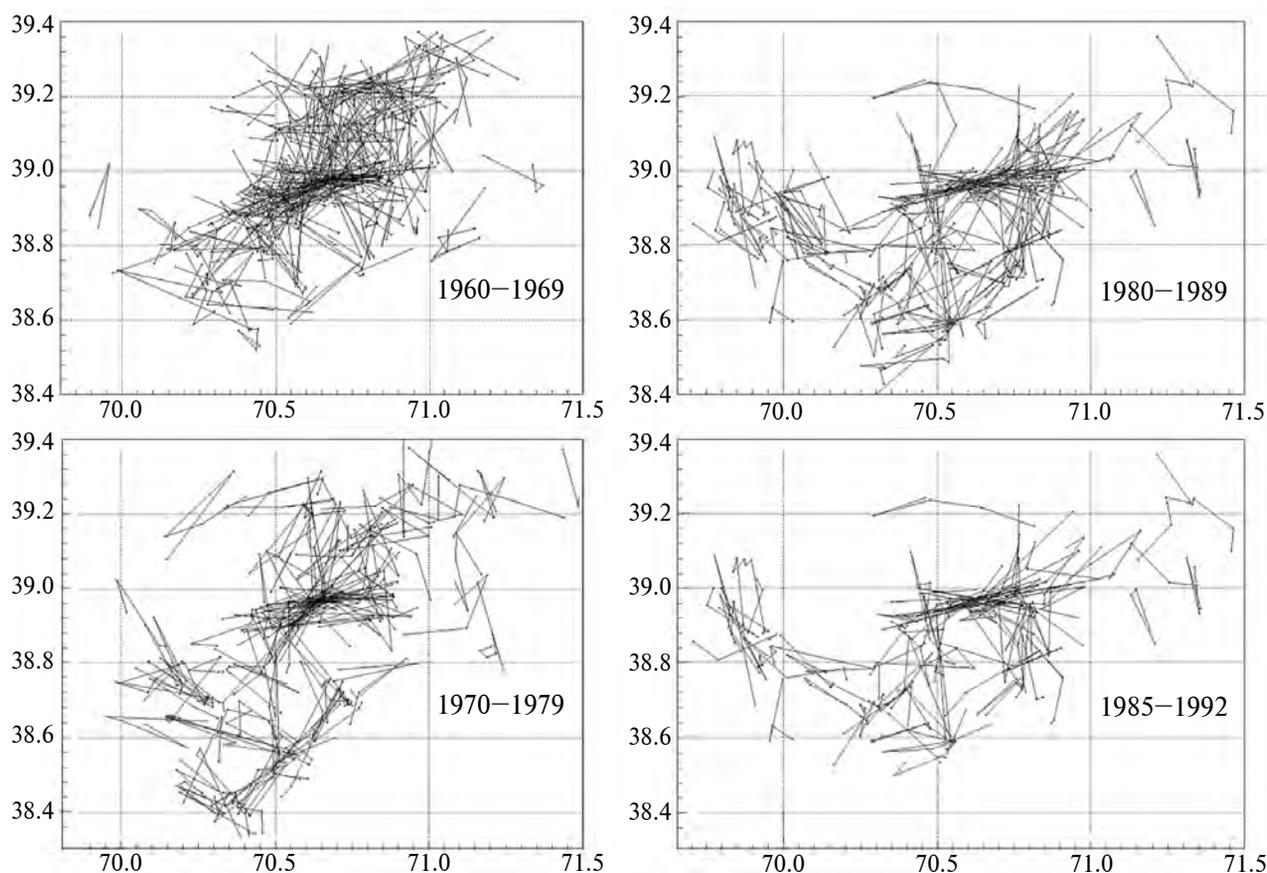


Рис. 6. Карта выделенных цепочек землетрясений с $K \geq 6.1$ в центральной части Гармского района для различных этапов времени, указанных на рисунке.

В структуре цепочек за различные временные интервалы наблюдается определенный порядок: сохраняются преимущественные направления в их простирации, а наблюдаемые сгущения цепочек хорошо согласуются с основными тектоническими структурами региона. В целом приведенная совокупность цепочек прорабатывает структуру поля групповых землетрясений, показанную на рис. 4.

Уместно также посмотреть, насколько полученный результат соответствует полученной нами ранее картине цепочек эпицентров землетрясений [Лукк, 1978]. Оговоримся заранее, что не стоит ожидать от такого сопоставления полного соответствия результатов по трем весьма веским причинам. Во-первых, в работе [Лукк, 1978] использовался каталог, построенный на базе ручных определений параметров землетрясений с использованием палеток изохрон, в отличие от используемого в настоящей работе каталога на базе машинных определений параметров землетрясений с учетом скоростной модели среды. Во-вторых, в работе [Лукк, 1978] цепочки строились по полному каталогу землетрясений, тогда как в настоящей работе поиск цепочек землетрясений осуществлялся лишь среди групповых землетрясений с гарантированной представительностью. И в-третьих, методики выделения цепочек принципиально различались в сопоставляемых работах. Кроме того, соединение эпицентров в цепочке осуществлялось при машинном построении в хронологическом порядке, а при ручном — в порядке их расположения друг от друга. Помимо этого, при ручном построении цепочек в работе [Лукк, 1978] использовалось порой дополнительное “экспертное” отсеивание некоторых цепочек, резко зашумляющих основную тенденцию.

Учитывая указанные выше трудности прямого сопоставления этих результатов, тем не менее можно отметить их похожесть на качественном уровне. Так, довольно ярко выраженная диагональность в простирации цепочек на рис. 7б прослеживается и на рис. 7а. Яркая ортогональность в простирации цепочек в северной половине района на рис. 7г уверенно просматривается и на рис. 7в. Тем самым можно утверждать, что, несмотря на существенные различия как в исходных данных, так и в способах их обработки, картина пространственного распределения цепочек эпицентров землетрясений оказывается довольно устойчивой, что является веским аргументом в пользу реального существования рассматриваемого явления.

При машинном картировании цепочек подобные технологии не применялись, из-за чего получившиеся графики зачастую трудно читаемы, особенно в мелком масштабе. Тем не менее мы все же провели подобное сопоставление на рис. 7.

5. ВЫДЕЛЕНИЕ ЦЕПОЧЕК ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В КАТАЛОГАХ ТУРЦИИ И ИРАНА

Далее мы опробовали предложенный алгоритм на данных Турецкого (<http://koeri.boun.edu.tr/seismo/2/earthquake-catalog>) и Иранского (<http://irsc.ut.ac.ir/billetin.php>) каталогов землетрясений за сроки соответственно 1994 – июль 2023 г. и 1996 – июль 2023 г.

Несколько слов о самих каталогах. Оба они неоднородные в силу существенных изменений количества регистрирующих станций во времени и связанной с этим различной представительной магнитудой M_c регистрируемых землетрясений на различных временных интервалах. Так, например, с 1996 по 2000 г. регистрация землетрясений в Иране велась всего лишь 17 станциями. С 2000 по 2005 г. было установлено дополнительно 20 станций. Оценки качества каталога во временном интервале 1996–2005 гг. показали, что полностью представительными за этот срок являлись землетрясения с $M \geq 4.2$. В 2006 г. сеть станций была дооборудована телеметрической системой наблюдения с более высоким уровнем регистрации. Это позволило регистрировать сейсмические события вплоть до $M = 1.0$ (которые были доступны в открытой печати), что привело к существенному улучшению представительной магнитуды на отрезке времени 2006–2010 гг. до $M_c = 2.0$ [Журавлев, Лукк, 2012]. В 2017 г. началось значительное сокращение числа наблюдательных станций, и в публикуемых каталогах Иранских землетрясений минимальный порог магнитуд был ограничен $M = 2.5$. Кроме того, были проведены какие-то изменения в обработке, которые привели к искажению формы графика повторяемости в окрестности магнитуды 3 (см. рис. 9а). В этой связи стоит заметить, что до 2016 г. график повторяемости для Ирана не имеет каких-либо особенностей на значении $M = 3$, а в период 2017–2023 гг. количество событий с $M = 2.8$ и особенно 2.9 резко завышено, при этом наблюдается точно такой же дефицит событий с $M = 3.0$ и 3.1. При этом суммарное количество событий с $M = 2.9 + M = 3.0$ в точности равно тому количеству, которое бы сформировало идеально линейный график повторяемо-

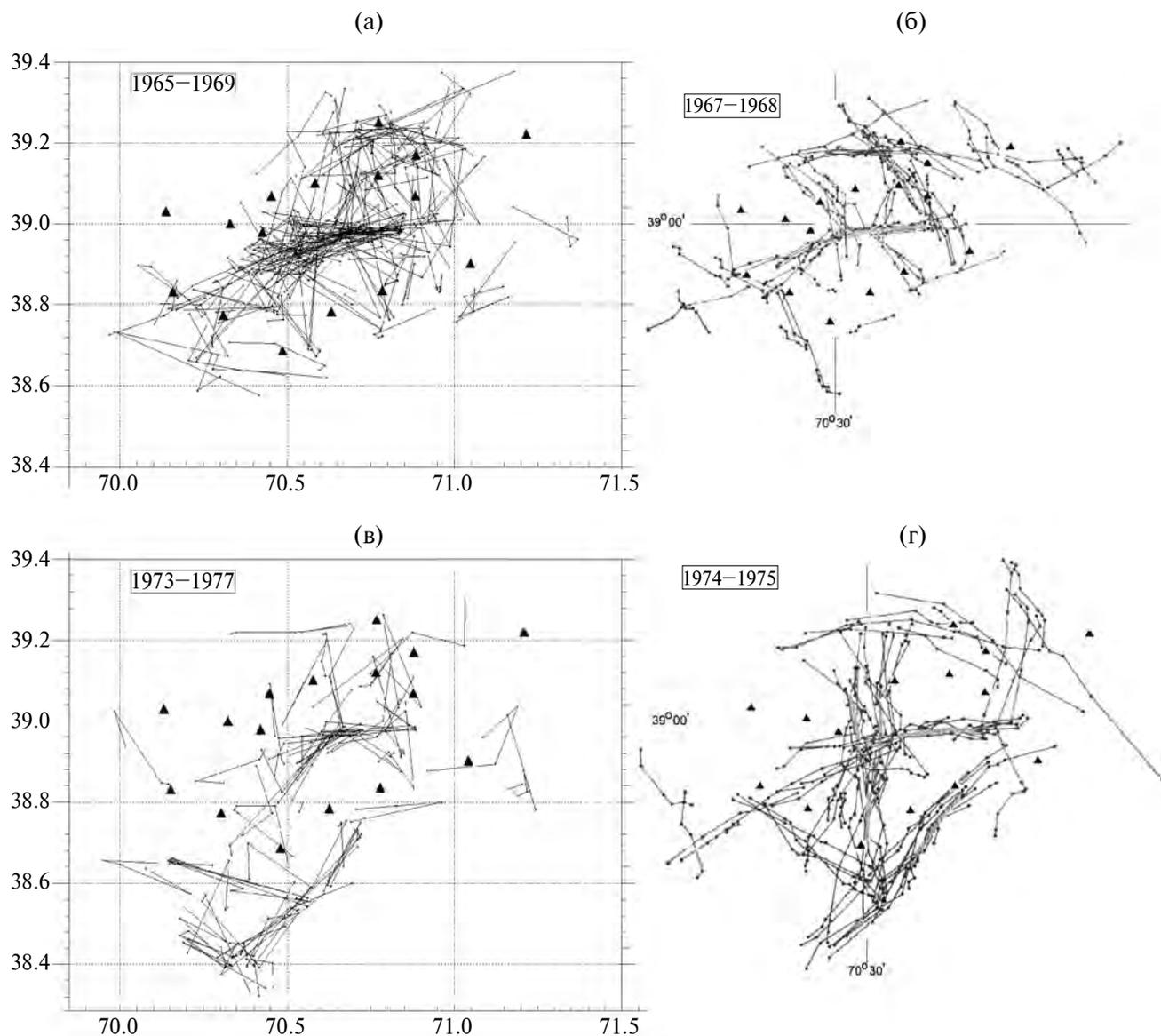


Рис. 7. Сопоставление результатов выделения цепочек землетрясений по “машинному” каталогу групповых землетрясений Гармского района (а) и (б) с результатами, полученными нами ранее в работе [Лукк, 1978] (в) и (г), по двум взаимно перекрывающимся в сопоставляемых работах временным интервалам, указанным на рисунке.

сти. Если формально заменить у 900 событий с $M = 2.9$ магнитуду на $M = 3.0$, то график повторяемости становится идеально линейным.

С учетом этого мы посчитали, что данная аномалия связана исключительно с техническим смещением занесенной в каталог магнитуды событий (при сохранении количества событий и всех других их характеристик). Но с точки зрения используемого нами метода анализа это обстоятельство не критично, так как предлагаемый алгоритм использует значение магнитуды только на этапе отбора представительных землетрясе-

ний. Поскольку мы не знаем, у каких именно событий была изменена магнитуда, пороговую границу M_c можно выбрать либо на уровне $M = 2.8$ (чтобы включить в анализ все события с $M \geq 2.8$ вне зависимости от того, корректная ли у них записана магнитуда или смещенная), либо все события с $M \geq 3.2$. Однако выбор $M_c = 3.2$ сильно ограничивает число событий в каталоге. С другой стороны, если допустить, что магнитуда у некоторых событий была искусственно занижена, и ввести в значения магнитуды соответствующие поправки, то график повторяемо-

сти получается идеально линейным, и по этому критерию каталог с $M \geq 2.8$ в эпоху 2006–2023 гг. можно считать полностью представительным.

С учетом этого мы решили провести все расчеты для землетрясений Ирана в двух вариантах. Во-первых, анализировались относительно сильные события: каталог за 1996–2005 гг. с представительной магнитудой $M_c = 4.2$. Во-вторых, анализировался гораздо более полный каталог за 2006–2023 гг. с $M_c = 2.8$.

О состоянии Турецкого каталога землетрясений можно судить по графику логарифмов среднесуточных значений чисел землетрясений во всем рассматриваемом временном интервале, приведенном на рис. 8. Обращает на себя внимание участок графика от 2004 до 2013 г., где сначала наблюдается рост числа землетрясений вплоть до 2012 г. и затем резкий спад до прежнего уровня в 2013 г. Рост числа землетрясений может быть связан с существенным наращиванием числа регистрирующих станций за указанный отрезок времени. В то время как кажущееся резкое падение числа землетрясений в 2013 г. может быть связано с изменением порога включения событий в каталог, обусловленного некоторым смещением магнитудных оценок M_d на M_L друг относительно друга для событий с минимальной энергией. Это может быть связано с изменением типа магнитуды с M_d на M_L в 2012 г. и затем на M_w в 2017 г. [Cambaz et al., 2019].

Отмеченная особенность находит свое отражение и на графике повторяемости землетрясений в этом временном интервале. Он претерпевает излом на увеличение чисел слабых землетрясений по сравнению с последующим временным интервалом начиная с $M = 3.7$. Это отчасти заметно и на графике повторяемости для всего временного интервала (см. рис. 9б).

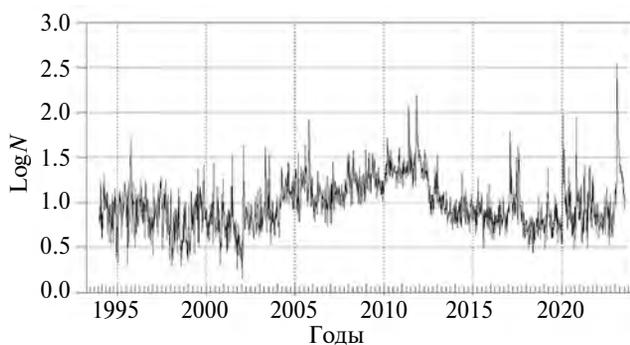


Рис. 8. Временной ряд логарифмов среднесуточных значений чисел турецких землетрясений во всем рассматриваемом временном интервале.

В обоих случаях (и для Турции, и для Ирана) мы провели предварительно дополнительный детальный анализ пространственно-временной неоднородности каталогов и выделили субрегионы, в пределах которых имеется достаточно высокая плотность распределения сейсмических станций, и, соответственно, качество данных обеспечивает возможность применения методики выделения групповых землетрясений ([Дещеревский и др., 2016а]) без дополнительных ограничений.

На рис. 9 приведены графики повторяемости для иранского (с $M_c = 2.8$) и турецкого (с $M_c = 2.7$) каталогов землетрясений (здесь и ниже для сокращения объема данные иранского каталога с $M_c = 4.2$ за 1996–2023 гг. в графическом представлении не показаны). В отличие от графика повторяемости иранских землетрясений, график повторяемости для турецких землетрясений не осложнен какими-либо особенностями в окрестности $M = 3$, что может служить свидетельством его большей однородности в области относительно малых магнитуд. Линия регрессии для графика повторяемости турецких землетрясений проведена без учета землетрясений с $M > 7$ из-за их непредставительности в столь коротком (для землетрясений такой силы) временном интервале.

Карты эпицентров всех иранских землетрясений с $M \geq 2.8$ за 2006–2023 гг. и одних только групповых землетрясений с глубиной $H \leq 21$ км приведены соответственно на рис. 10а и рис. 10б. Карты эпицентров для турецких землетрясений с $H \leq 21$ км и для соответствующих групповых землетрясений приведены на рис. 11а и рис. 11б. Рамки карт соответствуют территориям, где выделялись цепочки.

Пороговый интервал $H \leq 21$ км выбран нами исходя из распределения чисел землетрясений по глубинам, на основе которого отделяются мелкие коровые землетрясения от более глубоких (мантийных) землетрясений. Далее везде мы рассматривали именно лишь такие мелкие коровые землетрясения.

Подробная информация о необходимости уменьшения размеров рамки для расчетов по Турецкому каталогу землетрясений (см рис. 11б) будет приведена несколько ниже.

Результаты расчетов параметров группирования и выделения цепочек землетрясений для территорий Ирана и Турции приведены в табл. 2.

Число групповых землетрясений для Ирана составило соответственно 1491 и 18 575 для ката-

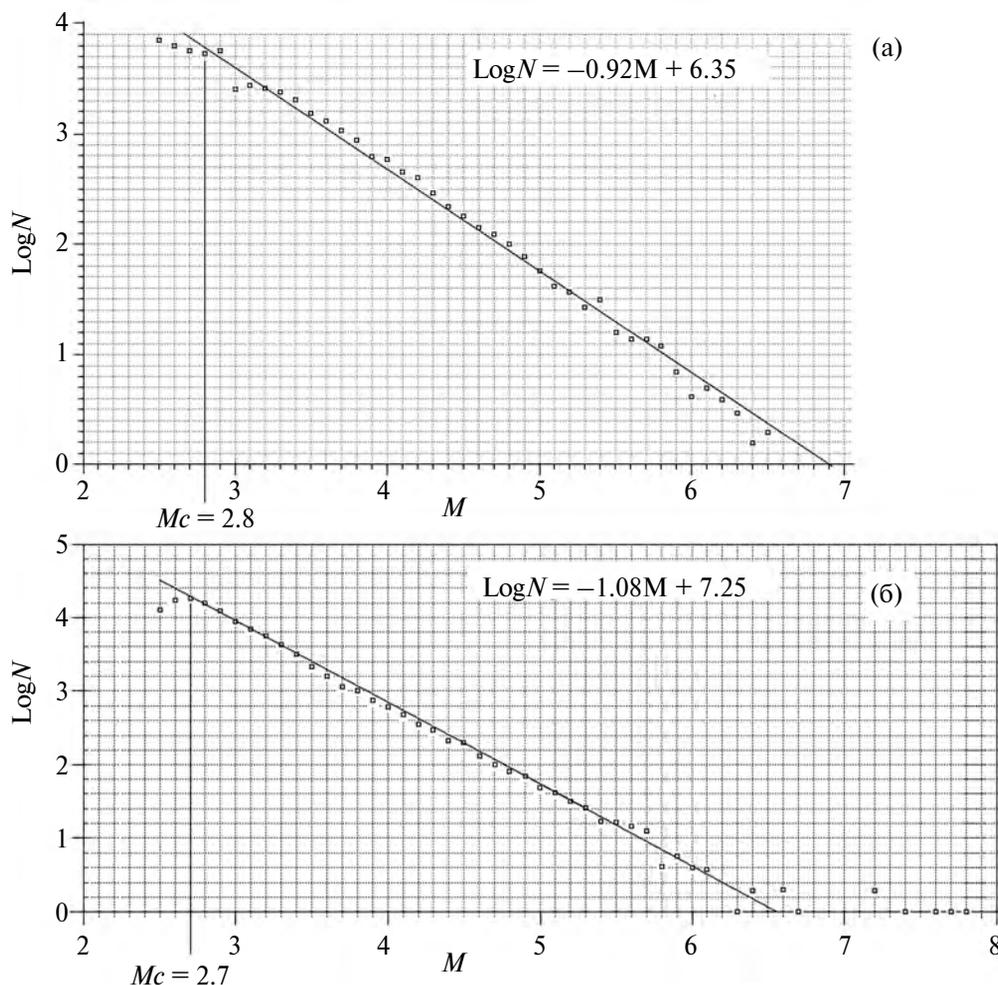


Рис. 9. Графики повторяемости для иранских (2006–2023 гг.) (а) и турецких (2000–2023 гг.) (б) землетрясений.

логов с $M_c = 4.2$ и $M_c = 2.8$ соответственно, и для Турции — 43 562 землетрясений с $M_c = 2.8$.

Как видно из сопоставления значений $R_{кр}$ для двух Иранских каталогов с $M_c = 4.2$ и $M_c = 2.8$, величина $R_{кр}$ практически не зависит от диапазона рассмотренных магнитуд. Этот результат еще раз подтверждает вывод о независимости параметров группирования от энергии землетрясений [Дещеревский и др., 2016а] и согласуется с предположением, что кластеризация характеризует в первую очередь саму геофизическую среду, а не особенности сейсмического процесса.

Интересно, что значения $R_{кр}$ для Ирана (60–74 км) и Турции (64 км) оказались значительно больше, чем в случае Гарма. Они в разы больше, чем для большинства компактных каталогов, рассмотренных в работе [Дещеревский и др., 2016а]. В указанной работе было также замечено,

что для тех регионов, где присутствуют крупные протяженные мегаразломы (например, Сан-Андреас) часто обнаруживается немонотонность кривой $Nn(R)$, а величины $R_{кр}$ могут быть значительно выше обычного (более 100 км). Похоже, что за счет своей большой протяженности такие разломы меняют такое свойство среды, как радиус взаимодействия между землетрясениями (он возрастает по сравнению с остальной территорией). С точки зрения алгоритма группирования это выглядит как нарушение однородности, что и приводит к неустойчивости оценок. Мы пока окончательно не разобрались с этим явлением, но обнаружили его и при построении кривой $Nn(R)$ для полной территории Турции ($R_{кр} = 130$ км), где присутствуют такие крупнейшие разломные зоны, как Северо-Анатолийская и Восточно-Анатолийская. Чтобы исключить этот эффект, мы приняли решение ограничить анализ лишь центральной частью

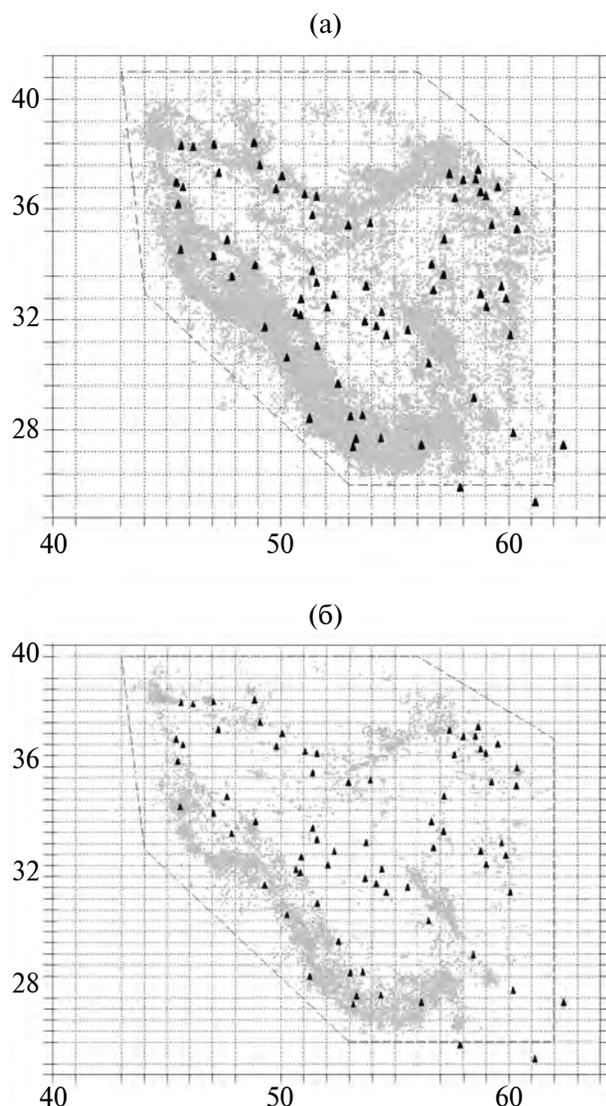


Рис. 10. Карта эпицентров всех иранских землетрясений за 2006–2023 гг. (а) и карта эпицентров групповых иранских землетрясений за тот же срок (б). Иранские регистрирующие станции, не проработавшие до конца срока наблюдения и удаленные в основном после 2010 г., на рисунке не приведены.

территории Турции в пределах Анатолийской плиты, на которой эти мегаразломы не проявляются (рис. 11).

Действительно, после исключения указанных разломных зон все встроенные статистики алгоритма группирования, характеризующие однородность территории и внутреннюю сходимость алгоритма, существенно улучшились.

Для построения цепочек землетрясений Ирана и Турции минимальное число событий в цепочке принималось равным 4, а погрешность определения эпицентров 7 км.

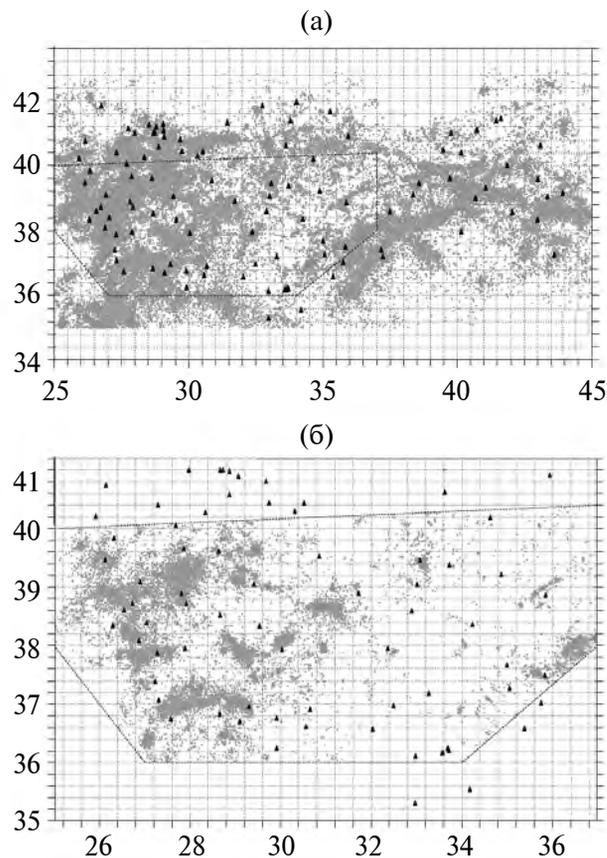


Рис. 11. Карты эпицентров всех турецких землетрясений за 2000–2023 гг. (а) и карта эпицентров групповых турецких землетрясений за тот же срок (б). Турецкие регистрирующие станции в количестве 101 шт. приведены за срок 2004–2015 гг.

На рис. 12 и рис. 13 приведены карты цепочек, построенных по каталогу Ирана с $M_c = 2.8$, для эпох 2006–2013 гг. и 2014–2023 гг.

Преобладающая длительность цепочек во времени для обоих каталогов составляет 2–9 суток.

Структура карт цепочек для Иранского каталога с $M_c = 2.8$ внешне совсем другая, чем в Гарме. Цепочки рассредоточены на отдельные компактные группы в пределах сплошного поля эпицентров (см. рис. 10). Отметим, что для первого временного интервала наблюдается некоторое преобладание простирающихся цепочек в северо-восточном–юго-западном направлении, в то время как для второго временного интервала оно сменяется на северо-западное–юго-восточное. Кроме того, довольно часто наблюдается присутствие двух систем цепочек сходной ориентации, расположенных иногда под острым углом, иногда почти перпендикулярных друг к другу (рис. 14).

Таблица 2. Параметры группирования и результаты выделения цепочек землетрясений по каталогам иранских и турецких землетрясений

Срок, гг.	M_c	$N_{пол}$	N_{21}	Кол-во групп	$N_{групп}$	Кол-во цепочек	$N_{цеп}$	$R_{кр}$, км	$T_{кр}$, сут	$L_{ср}$, шт.
ИРАН										
1996–2023	4.2	2421	1710	314	1491	38	298	60	94	7.8
2006–2023	2.8	32032	30271	3768	18575	514	4959	74	3	9.7
ТУРЦИЯ										
1994–2023	2.8	115000	43562	5123	30862	850	9195	64	1.4	10.8

Примечания: M_c – представительная магнитуда; $N_{пол}$ – количество событий в исходном каталоге; N_{21} – количество событий с глубинами $H \leq 21$ км (для Турции это величина в сильно усеченной рамке по сравнению со всей территорией – см. рис. 11); $N_{групп}$ – количество групповых землетрясений с $H \leq 21$ км; $N_{цеп}$ – количество событий во всех цепочках; $R_{кр}$ и $T_{кр}$ – критический радиус и критическое время селекции групповых событий, оцененные по методике из работы [Дешеревский и др., 2016а]; $L_{ср}$ – среднее число событий в цепочке.

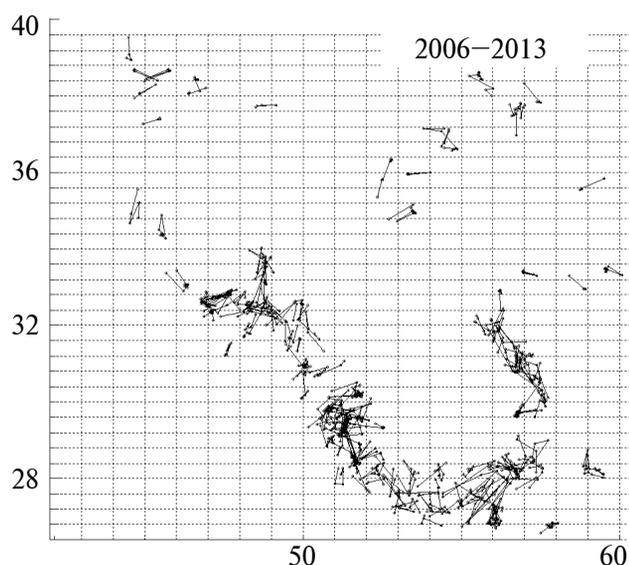


Рис. 12. Карта цепочек Иранских землетрясений для эпохи 2006–2013 гг. и 2017–2019 гг.

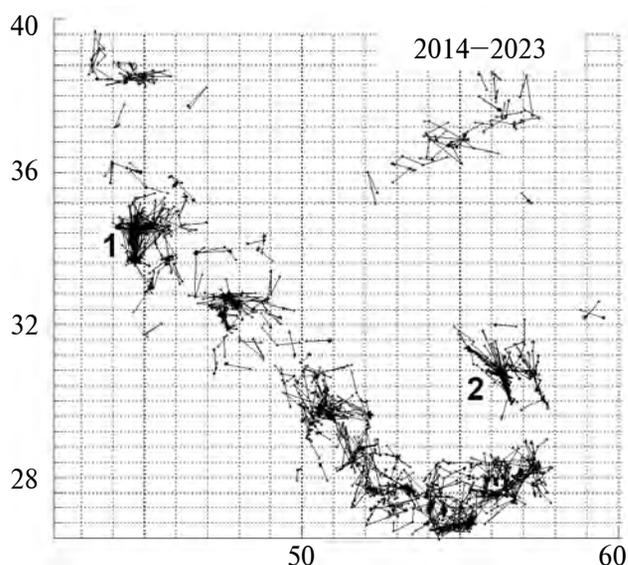


Рис. 13. Карта цепочек иранских землетрясений для эпохи 2014–2023 гг. Помечены два кластера (1 и 2), которые обсуждаются ниже.

На картах есть и другие, не менее яркие особенности. В частности, в отдельных случаях наблюдаются очень интересные совокупности цепочек, как бы выходящих из одного центра и покрывающих веером всю окрестность с вращением простирания последующих цепочек по мере развития процесса на $90\text{--}135^\circ$. Причем обычно весь цикл такого вращения азимутов укладывается в очень короткий временной интервал — не более нескольких месяцев. Стоит также отметить такую особенность проявления отдельных цепочек как практически полное их повторение по месту возникновения, причем повторяется только линия цепочки, а сами эпицентры могут смещаться. К сожалению, более

подробный анализ подобных явлений не входит в задачи этой работы из-за ограничений объема.

В целом можно заключить, что расположение и ориентация цепочек в основном согласуются с расположением и ориентацией известных тектонических структур. Вместе с тем для довольно значительной части цепочек такого соответствия не наблюдается. Вопрос о наличии либо отсутствии руководящих тектонических нарушений для этих цепочек пока что остается открытым.

Карты цепочек для турецких землетрясений в двух неперекрывающихся временных интервалах (2000–2011 гг. и 2012–2023 гг.) приведены соответственно на рис. 15 и рис. 16. В целом

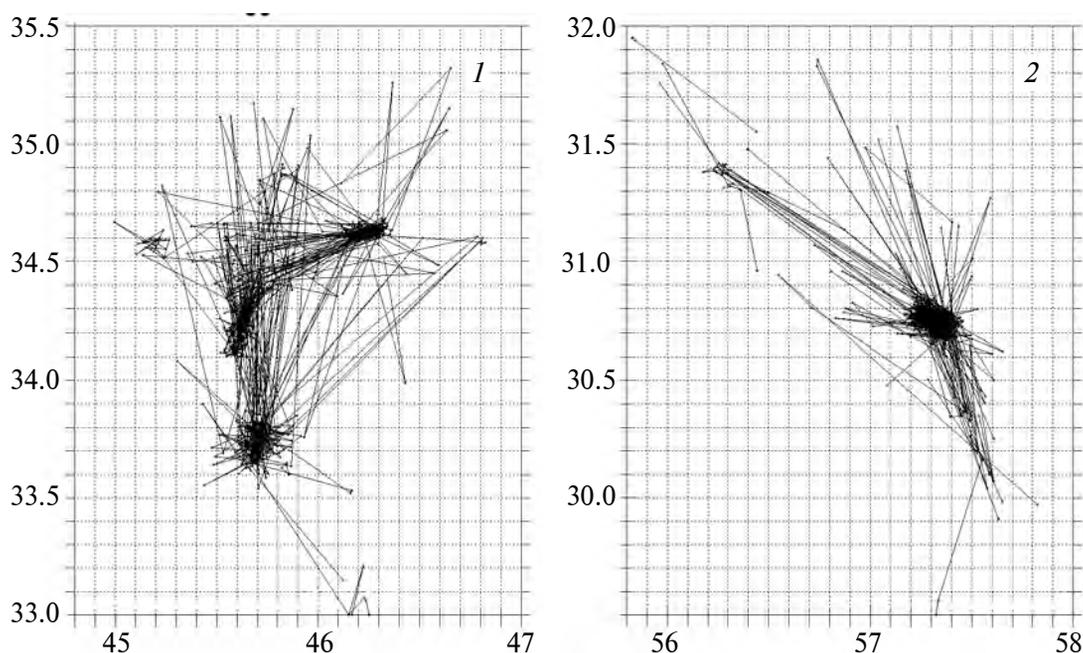


Рис. 14. Развернутые карты цепочек иранских землетрясений для двух кластеров (1 и 2) во временном интервале 2014–2023 гг.

для них характерны похожие закономерности: повторяемость цепочек в одних и тех же местах, наличие двух систем почти коллинеарных цепочек на многих локальных участках, отдельные участки с радиально расходящимися цепочками. Здесь также часто можно найти соответствие между цепочками (особенно повторяющимися) и активными тектоническими структурами. К сожалению, большое количество выделенных цепочек не позволяет их наглядно отобразить в региональном масштабе, тем более наложить на рисунки геологические структуры. По-видимому, качественный (экспертный) анализ подобного соответствия может быть выполнен лишь в пределах компактных геотектонических зон, что должно составить предмет отдельной работы.

6. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТОВ ЦЕПОЧЕК

Прежде чем перейти к анализу азимутов, стоит отметить, что предложенный нами метод построения цепочек землетрясений практически полностью исключает вклад субъективного фактора, за исключением фиксации границ региона. Пороговая магнитуда и параметры группирования оцениваются по сейсмическим данным и могут варьироваться лишь в довольно узком диапазоне. После составления каталога групповых событий произвол эксперта фак-

тически ограничен выбором минимальной длины цепочки и минимального числа событий в цепочке. Порог выбраковки “неподходящих” событий (который также задается экспертно) в любом случае должен быть небольшим, в силу чего его выбор лишь незначительно корректирует вид получающихся цепочек. Таким образом, расположение и азимуты цепочек почти исключительно определяются набором событий, включенных в сейсмический каталог, и могут служить объективной характеристикой этого каталога. Фактически эти цепочки можно рассматривать как особую форму обобщения и визуализации сейсмических данных, поэтому их анализ может представлять значительный интерес. С другой стороны, традиции работы с такой информацией пока еще не сложились, что требует критического подхода при применении стандартных методов в этих целях.

Обычно для визуализации распределения азимутов каких-то объектов строится круговая (“роза ветров”) или развернутая гистограмма. При этом исследователь должен задать два параметра: ширину бина и точное положение границ бина. При этом четких критериев выбора этих параметров не существует: так, с азимутом 0° можно совместить границу бинов либо центр какого-то бина — оба варианта вполне естественны и разумны. При визуализации целочисленных значений и малом размере бина на результаты также может влиять “эффект округления”.

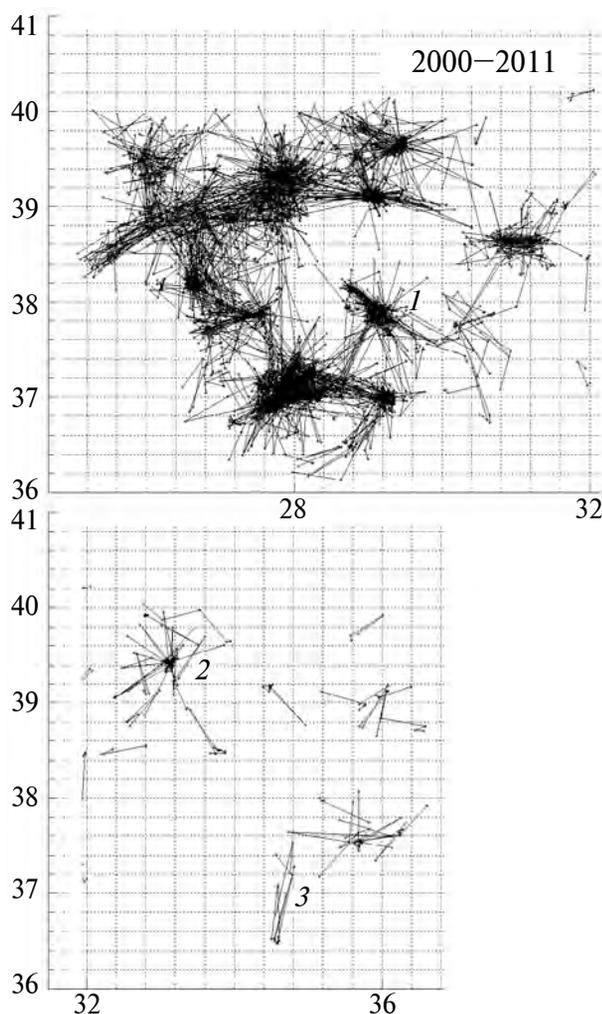


Рис. 15. Карта цепочек турецких землетрясений за 2000–2011 гг. Рисунок состоит из двух частей в целях сохранения читабельного масштаба.

Например, бин шириной 10° может включать интервал от -4.5° до $+4.5^\circ$, либо (с округлением) от -4° до $+5^\circ$, либо от -5° до $+4^\circ$ и т.д.

На рис. 17 показано четыре варианта гистограммы азимутов цепочек, найденных в каталоге Ирана. При анализе только одного из этих рисунков (любого) может сложиться впечатление, что на графике имеется множество интересных эффектов. При желании можно не только найти особые направления, но и обосновать систему взаимосвязей между наблюдаемыми экстремумами. Однако на самом деле устойчивость почти всех этих особенностей минимальна. Например, на рис. 17б максимальную амплитуду имеет бин с центром $+9^\circ$. Казалось бы, отсюда следует вывод, что цепочки с такими азимутами встречаются чаще других. Однако на рис. 17а и 17в это направление никак не выделено.

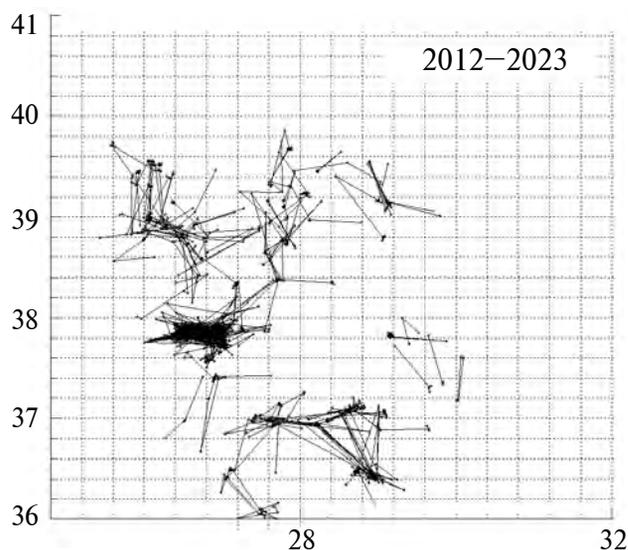


Рис. 16. Карта цепочек турецких землетрясений за 2012–2023 гг. На карте не указаны 4 цепочки, наблюдаемые в интервале $32-36^\circ$.

И наоборот, заметное на рис. 17а преобладание азимутов в районе -72° совершенно не читается на рис. 17б, а тем более рис. 17г.

Подчеркнем, что все четыре варианта рис. 17 построены по одним и тем же данным, с практически одинаковой шириной бинов и минимально возможным (на один градус!) смещением границ бинов. При более существенном изменении настроек вид гистограмм изменяется кардинально. Понятно, что иллюзия неслучайности гистограмм возникает на рис. 17 из-за недостаточного числа событий в каждом бине. Общее количество цепочек, найденных в каталоге Ирана, составило 514 шт. При ширине бинов $5-6^\circ$ это 14–17 событий в ячейке. В случае пуассоновского распределения стандартное отклонение числа событий в ячейке составит \sqrt{N} , т.е. ± 4 шт. Учитывая, что всего мы рассматриваем 30–36 бинов, можно ожидать, что в одном или в двух случаях отклонение числа событий от наиболее вероятного превысит 2σ , а примерно на каждой третьей гистограмме найдется столбик, где отклонение превысит 3σ (т.е. этот столбик будет почти в два раза выше всех остальных), что и наблюдается на рис. 17. Визуально такие аномалии очень похожи на неслучайные.

В этой связи стоит заметить, что при проведении поисковых расчетов, когда точные характеристики искомого эффекта заранее неизвестны, для его выделения обычно опробуется несколько вариантов расчета. В рассматриваемом примере исследователь вынужден выбирать между де-

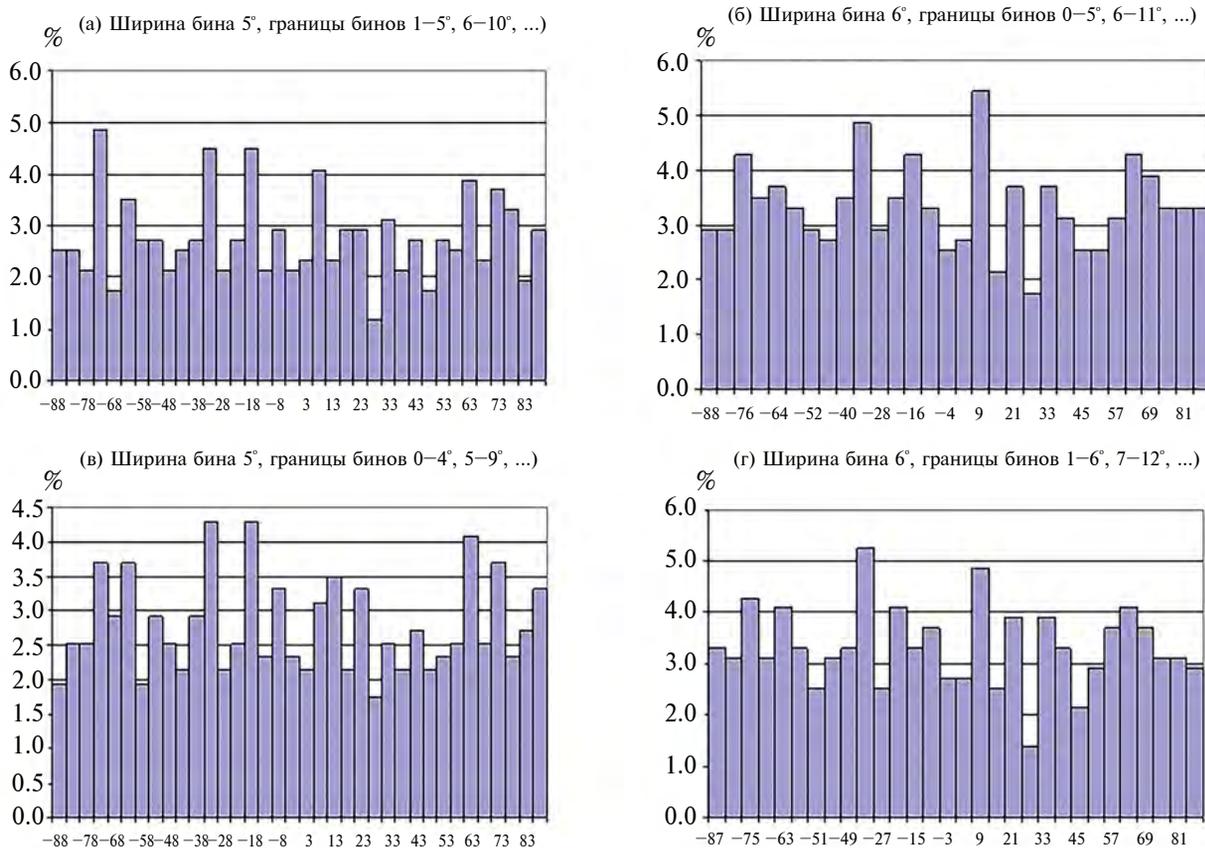


Рис. 17. Гистограммы распределения азимутов цепочек, найденных в каталоге Ирана, для разных вариантов группировки бинов.

сятками “разумных” вариантов визуализации данных. Понятно, что хотя бы некоторые из них просто в силу статистической изменчивости обязательно продемонстрируют “значимые” отклонения в отдельных бинах. В действительности, конечно, их “значимость” является иллюзорной, так как при ее оценке не учитывалось общее количество рассмотренных комбинаций.

С учетом этого обстоятельства для каждого региона мы построили гистограммы распределения азимутов в 10 вариантах: с шириной бина 5, 6, 10, 12 и 15 градусов и двумя вариантами положения границ бинов. Затем мы проверили отличие распределения от равномерного по критерию χ^2 для каждого варианта (табл. 3). Как видно из таблицы, в Иране распределение азимутов статистически неотличимо от равномерного, в Турции достоверно отличается от равномерного, а в Гарме оно определенно не является равномерным, хотя значимость этого отличия не очень высокая (от 0.5% до 14% в разных вариантах расчета).

Учитывая, что в Иране распределение азимутов цепочек статистически неотличимо от равномерного, более детальный анализ азимутов целесообразно провести для регионов Гарма и Турции. Для полноты на рис. 18 для каждого региона приведены три варианта расчета с шириной бинов 10, 12 и 15°. При ширине бина 10° стандартное отклонение для высоты каждого столбика примерно равно 1.1% и 0.8% для Гарма и Турции, при ширине бина 15° — 1.3% и 1.0%.

Для Турции избыточное количество цепочек наблюдается на азимутах от +40° до +110°, относительный недостаток — от -30° до +40° (рис. 17). Заметим, что выбранный нами для анализа регион (рис. 11) не включает Восточную Турцию, где доминируют субширотные мегаразломы. Тем не менее гистограммы показывают достаточно выраженное преобладание цепочек субширотного направления, что может указывать на избыток тектонических структур аналогичного простирания в рассматриваемом регионе.

Таблица 3. Вероятность, что распределение неотлично от равномерного для разных способов группировки значений в бины

Район Размер бина, град.	Гарм		Иран		Турция	
	а	б	а	б	а	б
5	0.041	0.082	0.12	0.65	0.0002	0.0002
6	0.142	0.130	0.50	0.46	0.0002	0.0002
10	0.004	0.010	0.60	0.79	0.0000	0.0000
12	0.021	0.019	0.59	0.40	0.0000	0.0000
15	0.005	0.005	0.47	0.47	0.0001	0.0001

Примечания: а, б – два варианта положения границ бинов; оценка по критерию χ^2 .

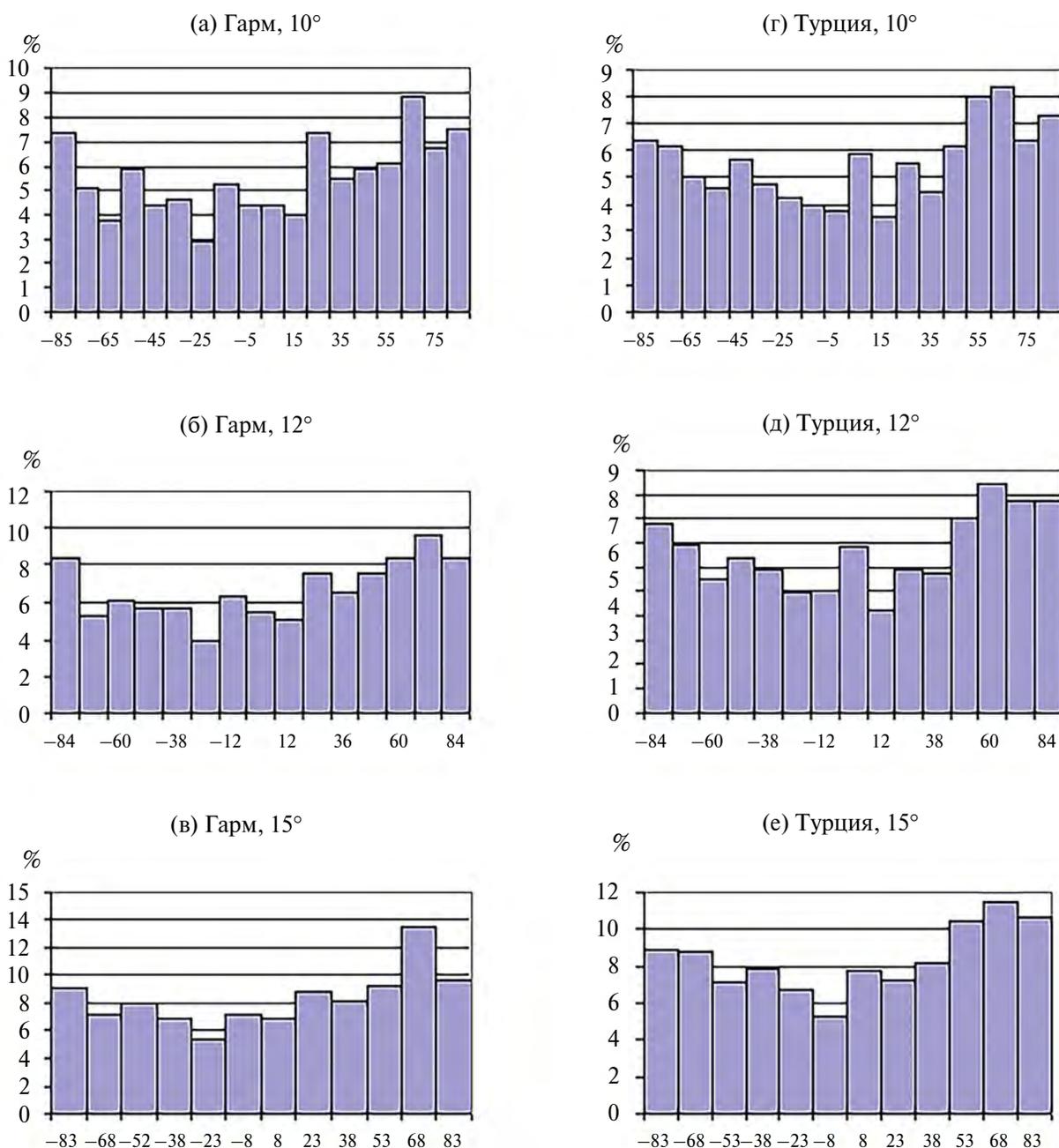


Рис. 18. Гистограммы распределения азимутов цепочек, найденных в каталогах Гарма и Турции. Для каждого региона показаны три варианта группировки бинов, что позволяет оценить устойчивость наблюдаемых эффектов.

В Гарме определенное преобладание имеют азимуты от 60 до 100°, что согласуется с простиранием основных разломов и элементов рельефа. При этом имеется дефицит цепочек с азимутами от -70 до +20° (с довольно большими флуктуациями гистограмм в этом диапазоне).

С одной стороны, эти результаты указывают на целесообразность анализа размещения и ориентации цепочек в пределах относительно локальных субрегионов, для которых карты цепочек могут быть непосредственно сопоставлены с геологическими структурами (в данной работе мы не смогли это сделать из-за ограничений объема). С другой стороны, сглаживание региональных особенностей может способствовать обнаружению каких-то более общих закономерностей, имеющих надрегиональный характер, в частности в виде “глобальной трещиноватости”.

Впервые гипотеза о существовании подобных закономерностей (“глобальной трещи-

новатости”), по-видимому, была высказана В.Х. Хоббсом [Hobbs, 1911]. Позже на вероятный значительный вклад планетарных причин в формирование разрывных нарушений и связанных с ними структурных и морфологических образований указывал Эли де Бомон [Elie de Boumont, 1929]. Впоследствии эти идеи получили подробное освещение в целом ряде работ, например, [Vening-Meinesz, 1947; Stille, 1947; Михайлов, 1956; Sonder, 1956; Moody, 1966; Шатский, 1964; Каттерфельд, Чарушин, 1960; 1969; 2003; Шульц, 1965; 1966; 1969; 1971; 1973; Мартынова, 1969; Гамкрелидзе, 1972; Лукк, Леонова, 1978; Лукк, 1980; Лукк, Мирзоев, 2020]. Многими исследователями признается существование двух пар сопряженных систем разломов — широтно-меридиональной или ортогональной (С–Ю и 3–В или 0° и 90°) и диагональной (СЗ–ЮВ и СВ–ЮЗ или 315° и 45°), одинаково секущих земную кору в подавляющем большинстве районов земного шара. В частности, В.И. Макаровым [Макаров, 1977] подобный правильный рисунок системы

Таблица 4. Отклонение фактического количества цепочек, тяготеющих к направлениям -45°, 0°, +45°, +90°, от ожидаемого в случае равномерно распределения азимутов цепочек

Азм	Азимут -45°				Азимут 0°				Азимут +45°				Азимут +90°				
	W	Г	Т	И	Ср.	Г	Т	И	Ср.	Г	Т	И	Ср.	Г	Т	И	Ср.
1	-0.4	-1.7	-1.1		-1.1	-0.4	-0.3	-1.1	-0.6	-0.4	0.6	0.1	0.1	0.8	1.5	0.7	1.0
3	-0.3	-0.8	0.1		-0.3	-0.7	0.0	-0.9	-0.5	0.0	2.1	-0.9	0.4	-0.3	0.8	-0.5	0.0
5	-0.1	-0.9	-0.9		-0.6	-0.3	0.1	-0.9	-0.4	0.5	1.5	-1.1	0.3	0.5	1.7	-0.3	0.6
7	-0.8	-0.4	-1.1		-0.8	-0.4	0.0	-1.3	-0.6	0.3	1.2	-0.7	0.3	0.8	1.0	-0.9	0.3
9	-1.2	0.2	-0.9		-0.6	-0.4	0.2	-0.9	-0.4	0.0	1.2	-0.7	0.2	1.7	1.9	-0.1	1.2
11	-0.9	-0.1	-0.8		-0.6	-0.9	-0.1	-1.1	-0.7	0.4	0.6	-1.0	0.0	1.1	1.7	-0.3	0.8
13	-1.1	-0.6	-0.7		-0.8	-1.1	0.1	-1.7	-0.9	0.4	1.6	-0.8	0.4	1.6	1.9	-0.2	1.1
15	-0.9	-0.3	-0.4		-0.6	-1.4	-0.7	-1.3	-1.1	0.2	1.6	-1.0	0.2	1.6	2.3	-0.7	1.1
17	-0.7	-0.3	-0.7		-0.5	-1.8	-0.9	-1.2	-1.3	0.5	1.1	-1.4	0.1	2.2	2.2	-0.8	1.2
19	-0.7	-0.9	-0.6		-0.7	-1.4	-1.0	-0.3	-0.9	0.8	1.5	-1.3	0.4	2.4	2.5	-0.8	1.3
21	-0.5	-0.6	-0.5		-0.5	-1.3	-1.5	0.4	-0.8	0.5	1.4	-1.2	0.2	2.5	2.1	-0.4	1.4
23	-0.9	-0.7	-0.1		-0.6	-1.3	-2.0	-0.1	-1.1	0.3	1.3	-0.9	0.2	2.2	2.4	-0.5	1.4
25	-0.9	-1.3	0.1		-0.7	-0.5	-2.2	0.2	-0.8	0.0	0.8	-1.0	-0.1	2.1	2.7	-0.9	1.3
27	-1.0	-1.4	0.6		-0.6	-0.9	-2.3	-0.1	-1.1	0.0	1.3	-0.6	0.2	1.5	2.4	-0.5	1.2
29	-1.0	-1.2	0.4		-0.6	-1.2	-2.5	-0.2	-1.3	0.1	1.5	-1.0	0.2	1.4	2.1	-0.5	1.0
31	-1.1	-1.1	0.1		-0.7	-1.5	-2.6	-0.2	-1.4	0.6	1.5	-1.2	0.3	1.3	2.1	-0.9	0.8

Примечания: W – ширина сектора, в котором подсчитывалось число цепочек; Г, Т, И – регионы Гарма, Ирана и Турции; Ср. – среднее по трем регионам. Величина отклонения приведена в единицах σ ; фоном выделены отклонения, превышающие 2σ .

тектонических разрывных нарушений (вплоть до макротрещиноватости горных пород) был обнаружен в Центральном Тянь-Шане — очень активном в тектоническом плане районе.

Построенные нами карты цепочек позволяют формально проверить гипотезу об относительном преобладании азимутов, близких к указанным направлениям, в изученных регионах. Поскольку точность совпадения азимутов с направлениями на СЗ, С, СВ и В заранее неизвестна, мы оценивали все статистики для секторов любой ширины от 1 до 30° (всего 16 вариантов ширины сектора).

Результаты анализа приведены в табл. 4. Значение в каждой ячейке показывает недостаток или избыток цепочек соответствующего направления (в пределах заданного сектора) по сравнению со значением, ожидаемым для равномерного распределения азимутов. Величина отклонения указана в единицах σ . Такая нормировка необходима из-за того, что ожидаемое количество цепочек зависит от ширины сектора, и сравнивать отклонения, выраженные в абсолютных величинах, было бы неудобно.

Полужирным шрифтом в табл. 4 выделены отклонения, превышающие 2σ . Заметим, что при равномерном распределении азимутов вероятность отклонения свыше 2σ близка к 4%. Если бы значения в разных ячейках таблицы были бы взаимно независимы, то отклонения, превышающие 2σ , должны были бы в среднем встречаться дважды в каждом столбце таблицы (для каждого региона). В действительности каждый более широкий сектор включает в себя более узкие сектора, поэтому приведенные значения не являются независимыми. Однако это влияет в первую очередь на дисперсию ожидаемого количества “затемненных” ячеек (из-за коррелированности значений она увеличивается), а матожидание их количества меняется гораздо слабее.

Как видно из табл. 4, для азимутов -45 , 0 и $+45^\circ$ общее количество “больших” отклонений примерно соответствует ожидаемому для равномерного распределения. Причем, в случае Турции аномалия в секторах максимальной ширины с центральным азимутом 0° соответствует дефициту цепочек, а не их избытку. Таким образом, для всех трех направлений ЮВ—СЗ, Ю—С, ЮЗ—СВ нет оснований считать, что они как-то выделены и что доля цепочек, тяготеющих к этим азимутам, хоть как-то повышена.

Для азимута 90° картина чуть более сложная. При ширине сектора от 15 до 30° (что

соответствует диапазонам азимутов от $[83-97^\circ]$ до $[75-105^\circ]$) и в Гарме, и в Турции наблюдается определенный избыток цепочек этого направления. В этой связи стоит пояснить, что при погрешности определения координат эпицентров 5–7 км, вероятном количестве событий в цепочке 4–5 шт. и ее длине порядка 30 км ожидаемая погрешность определения азимута цепочки не превышает нескольких градусов. Поэтому тот факт, что избыток цепочек наблюдается лишь в достаточно широких секторах, не является следствием высокой погрешности определения азимута, а указывает на отклонение преобладающего азимута цепочек от строго широтного направления (концентрация азимутов максимальная в направлении В—СВ).

Вместе с тем для Ирана субширотные цепочки встречаются реже, чем можно было бы ожидать (почти все отклонения отрицательные). Поэтому при объединении данных по трем регионам аномалия (избыток) субширотных цепочек практически исчезает. Таким образом, можно сделать вывод, что обнаруженный избыток субширотных цепочек с азимутами около $+80^\circ$, по-видимому, имеет региональный характер и обусловлен преобладанием тектонических структур соответствующего простирания в Гарме и в Турции.

Выше уже отмечалось, что большинство цепочек землетрясений можно сопоставить с известными тектоническими структурами. С учетом этого возникает определенное противоречие между гипотезой о преобладании в земной коре разломов определенных направлений и отсутствием такого эффекта в цепочках землетрясений в рассмотренных регионах. Как и любое противоречие между моделью и данными, оно указывает на перспективность более детального изучения этих вопросов. При этом, однако, стоит учитывать, что азимуты цепочек событий — это формализованная статистика, объективно характеризующая сейсмичность, в то время как при обработке геолого-тектонической информации (на которой основана проверяемая гипотеза) до сих пор невозможно обойтись без экспертного анализа.

7. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Впервые факт существования линейных последовательностей эпицентров слабых ($M = 1-4$) землетрясений был замечен почти полвека назад А.А. Лукком [Лукк, 1978] в ходе анализа сейсмических данных, полученных в зоне сочленения Памира и Тянь-Шаня на Гармском геодинами-

ческом полигоне [Сидорин, 1990]. Автором такие последовательности были названы “цепочками эпицентров землетрясений”. Реальность существования таких цепочек в дальнейшем была подтверждена многочисленными исследованиями.

В данной работе предложено новое понимание подобных структур, рассматриваемых в качестве одного из проявлений самоорганизации сейсмотектонического процесса. Такая самоорганизация проявляется, в частности, в форме кластеров взаимосвязанных землетрясений, которые могут включать не только афтершоковые и форшоковые серии, но и рои землетрясений, а также другие группы событий, расположенных в непосредственной близости друг от друга в обобщенном пространстве, включающем обычные и временную координаты [Дещеревский и др., 2016а; 2016в].

Для выявления цепочек событий нами предложен авторский алгоритм, основанный на выделении вырожденных кластеров с экстремально высокой анизотропией, когда большинство входящих в кластер событий располагается на одной прямой линии или почти на ней. Помимо анизотропии, кластер должен удовлетворять некоторым другим требованиям, включая достаточный линейный размер и достаточное число событий. Эти дополнительные ограничения призваны отсеять спонтанно возникающие случайные линейные группы, сформированные в результате статистических флуктуаций. Тестирование алгоритма на рандомизированных каталогах показало, что, несмотря на мягкость введенных ограничений, они более чем достаточны для отсека случайных цепочек. В частности, в случае перемешивания либо времен, либо координат событий (а тем более и того, и другого) в реальном каталоге цепочки в нем полностью исчезают. А вероятность обнаружения даже единичных цепочек в совершенно случайном каталоге объемом в десятки тысяч событий составляет триллионные доли процента.

Как и при любом способе статистической обработки данных, при выделении цепочек важную роль играют настроечные параметры алгоритма. Особую опасность может представлять чрезмерная адаптивность метода, которая может достигаться как благодаря большому числу настраиваемых параметров, так и благодаря вариативности самого алгоритма. Угроза заключается в том, что алгоритм подстраивается к данным в большей степени, чем это обосновано статистически (так

называемая “сверхподгонка” [Переобучение, 2023]). В результате в данных обнаруживаются именно те паттерны, существование которых было заранее постулировано авторами алгоритма, даже если в действительности для этого нет достаточных статистических оснований. Причем никакая проверка значимости такого паттерна с помощью формальных критериев в этом случае не является вполне честной, так как эти критерии всегда строятся в рамках определенного алгоритма (модели) и не учитывают, что авторы могли перепробовать десятки или сотни разных комбинаций параметров (алгоритмов), чтобы в итоге получить “значимый” результат [Дещеревский, Сидорин, 2004; 2013; Дещеревский, 2022].

Мы приняли все возможные меры, чтобы избежать такой ситуации, всячески ограничивая количество и вариативность “свободных параметров” алгоритма. Мы стремились к тому, чтобы результаты расчетов определялись прежде всего характеристиками сейсмичности и лишь в минимальной степени могли зависеть от пожеланий (предпочтений) исследователя. Его свобода фактически ограничена выбором сейсмического каталога и пространственно-временных границ региона исследования (правда, на практике расчеты могут быть выполнены далеко не для каждого региона: если сейсмичность не удовлетворяет определенным критериям, например, регион недостаточно однороден, то алгоритм сообщает о несоответствии данных требованиям модели, что делает невозможным расчет цепочек).

Все остальные параметры алгоритма либо оцениваются по каталогу, либо выбираются в соответствии с очевидными физическими ограничениями, что позволяет варьировать их лишь в достаточно узких пределах. Так, хотя минимальный порог представительных магнитуд оценивается, однако исследователь может использовать для этого разные методы: вводить поправки за пространственно-временную неоднородность, учитывать иные априорные соображения и с учетом этого фактически обычно имеет свободу выбора точного значения представительной магнитуды M_c в пределах 0.2–0.3, иногда 0.5 ед.

Примерами настраиваемых (а не оцениваемых) параметров алгоритма являются минимальный эксцентриситет кластера, по которому может строиться цепочка землетрясений, а также его минимальный линейный размер. В частности, увеличение требований к эксцен-

триситету приведет к тому, что алгоритм будет обнаруживать лишь вырожденные цепочки, все эпицентры которых в точности лежат на прямой линии. Однако в реальных каталогах координаты эпицентров всегда определяются с определенной погрешностью. Поэтому нет никакого смысла требовать, чтобы разброс событий относительно прямой линии был меньше этой погрешности. Аналогично с физической точки зрения бессодержательно строить цепочки, длина которых соизмерима с погрешностью определения координат эпицентров (она должна быть хотя бы в несколько раз больше погрешности). Поэтому, несмотря на значительное число настроек, предложенный алгоритм исключает возможность существенной “подгонки” результата под заранее известный ответ. Последнее утверждение можно проиллюстрировать, например, тем обстоятельством, что полученные нами результаты вступили в определенное противоречие с некоторыми обобщениями геологических данных, включая и собственные наблюдения одного из авторов этой работы. Тем не менее нам не удалось разрешить это противоречие, варьируя параметры счета: результаты продемонстрировали достаточную устойчивость карты цепочек.

Фактически тот или иной выбор свободных параметров алгоритма позволяет влиять лишь на общее количество выделенных цепочек и степень их линейаризации. А вот такие характеристики, как расположение цепочек на местности и их азимуты, почти исключительно определяются набором землетрясений, включенных в каталог, а именно временами и координатами очагов. Это не только следует из самой структуры предложенного алгоритма, но и подтверждается численным моделированием. Тем самым построенные цепочки можно рассматривать как особую форму обобщения и визуализации сейсмических данных.

Предварительный анализ показывает, что значительная часть выделенных цепочек может быть сопоставлена с известными геотектоническими структурами. Этот факт позволяет рассматривать такие цепочки, как маркеры тектонических нарушений, активизация которых проявляется в форме линейного кластера эпицентров землетрясений.

Вместе с тем для существенной части цепочек установить соответствие с геологией пока что не удастся. Вопрос о том, связаны ли причины этого с недостаточной детальностью геологической информации или же некоторые цепочки

могут формироваться вне связи с наличием явных тектонических нарушений, остается открытым. Также тут надо учитывать, что мы рассматривали эпицентры событий с глубинами до 21 км, а экстраполяция геологических данных на такие глубины обычно не очень надежна.

Реальность такого явления, как линейные цепочки землетрясений, подтверждается не только результатами численного моделирования, но и тем фактом, что эксцентриситет большинства кластеров изначально близок к заданным нами критическим уровням или же их превышает, так что удаление событий-помех фактически выполняется лишь в очень небольшой доле случаев. Также можно отметить высокую степень согласия между результатами формального построения цепочек предложенным методом и ранее построенными цепочками для Гармского региона [Лукк, 1978; Лукк, Турчанинов, 1998]. Примечательность этого факта обусловлена тем, что в сравниваемых работах использовались не только разные исходные данные (предварительный оперативный каталог и финализированный), но и разные способы выборки землетрясений (с включением непредставительных магнитуд и с выбраковкой таких событий) и совершенно различные алгоритмы (полностью формализованный анализ кластерных землетрясений; частично формализованный алгоритм с анализом представительных землетрясений; экспертный подход с анализом полного каталога событий). Согласие результатов, полученных с помощью столь разных подходов, было бы невозможным, если бы мы наблюдали какие-то случайные артефакты, а не объективно существующее природное явление.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В настоящей работе предложено новое понимание природы связанных в пространстве и времени линейных последовательностей эпицентров землетрясений, которые рассматриваются как подкласс групповых событий. Кластер взаимодействующих событий перекалифицируется в цепочку, если он включает не менее 4 событий и имеет резко выраженную анизотропию (сильно вытянут в одном направлении), а его линейный размер многократно превосходит погрешность оценки координат землетрясений в каталоге.

2. Разработан алгоритм выделения линейных цепочек эпицентров землетрясений, удовлетворяющих этим критериям. Численным моделированием подтверждена крайне низкая

вероятность самопроизвольного формирования цепочек в случайном каталоге, что подтверждает реальность существования рассматриваемого природного явления.

Алгоритм интегрирован в авторский пакет программ ABD, предназначенный для анализа геофизических временных рядов и сейсмических данных [Дещеревский и др., 2016; 2016в]. Исходные тексты и исполняемые файлы программ можно получить у авторов [Дещеревский, 2021].

3. При построении алгоритма авторы стремились к тому, чтобы результаты расчетов определялись прежде всего характеристиками сейсмичности и лишь в минимальной степени могли зависеть от пожеланий (предпочтений) исследователя. Несмотря на ограниченный опыт использования алгоритма, результаты тестирования на модельных и рандомизированных каталогах показывают, что эта цель в целом достигнута. И хотя общее количество формируемых цепочек действительно зависит от выбора свободных параметров алгоритма, целенаправленно повлиять на их расположение и ориентацию таким способом невозможно. С учетом этого наборы (карты) цепочек можно рассматривать как одну из объективных характеристик каталога, дополняющую известные статистики и позволяющую визуализировать и анализировать сейсмические данные под новым углом зрения.

4. Сравнение карт цепочек, построенных предложенным способом для Гармского региона, с аналогичными цепочками, построенными ранее для этого региона совершенно другими методами по другим данным, показывает хорошее согласие между ними. Этот факт подтверждает реальность существования цепочек землетрясений.

5. Пространственно-временная организация цепочек имеет сложный характер и нуждается в дальнейшем изучении. Предварительный анализ показывает наличие таких паттернов, как повторяемость цепочек в одних и тех же местах (при этом координаты землетрясений, формирующих такие цепочки, могут не совпадать), приуроченность значительной части цепочек к известным геолого-тектоническим структурам, систематическое возникновение в пределах достаточно компактных территорий двух систем квазипараллельных цепочек с разными азимутами, и т.д. В отдельных случаях наблюдается эффект вращения азимутов цепочек, выходящих из одной точки, а также эффект чередования ак-

тивности двух альтернативных систем цепочек в пределах одного региона. Такое преобладание одной системы цепочек над другой в разные периоды времени предлагается понимать как проявление динамики развития тектонического процесса.

6. Анализ распределения азимутов цепочек показывает, что для Ирана это распределение неотлично от равномерного, а в регионах Центральной Турции и Гарма имеется относительное преобладание цепочек В–СВ направления. Более тонкие особенности гистограмм азимутов (рис. 16 — рис. 17), скорее всего, незначимы, несмотря на наличие отдельных направлений с резко повышенным (3σ и более) либо резко пониженным числом цепочек. При оценке значимости таких отклонений необходимо учитывать суммарное количество опробованных вариантов расчета (включая и число бинов на гистограмме азимутов), что очень существенно влияет на распределение ожидаемых вероятностей.

7. Анализ количества цепочек с азимутами, близкими к СЗ–ЮВ, С–Ю, СВ–ЮЗ или В–З, показывает, что все эти направления никак не выделены статистически. Тем самым гипотеза об относительном преобладании в земной коре разломов соответствующих направлений не находит своего подтверждения в структуре поля цепочек землетрясений для рассмотренных регионов.

В целом наиболее обоснованным представляется вывод, что наблюдаемые цепочки событий можно рассматривать как маркеры тектонических нарушений, в том числе и пока не идентифицированных геологическим методом. Важно, что для построения карты цепочек используются только и исключительно данные о сейсмичности, получаемые инструментально, без привлечения каких-либо априорных гипотез и допущений. Обработка сейсмической информации ведется формализованным способом, исключая существенное влияние исследователя-эксперта на получаемые результаты.

Есть основания полагать, что более подробное изучение как самой структуры цепочек землетрясений, так и ее изменений во времени в различных сейсмоактивных регионах мира, может способствовать продвижению в понимании динамики сейсмического процесса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят рецензентов за многочисленные полезные замечания, предоставленную

дополнительную информацию о возможных причинах уменьшения потока землетрясений в каталоге Турции в 2012–2013 гг. и предложения по улучшению читаемости рисунков, а также благодарят рецензента, обратившего внимание на целесообразность визуализации графика на рис. 3 в билогарифмических координатах.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Автоматизированная обработка данных на Гармском полигоне / Сидорин А.Я. (ред.). М.-Гарм: ИФЗ АН СССР. 1991. 215 с.
- Альшанский М.А.* Теория вероятностей и математическая статистика. Учебное пособие. Мин. науки и высшего образования РФ. Екатеринбург: изд-во Урал. ун-та. 2021. 224 с.
- Белл Дж.Ф.* Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Т. 1 М.: Наука. 1984. 596 с.
- Введенская А. В.* Особенности процесса разрушения и энергетический баланс в очагах землетрясении. Земная кора сейсмоопасных зон. М.: Наука. 1973. С. 25–37.
- Вессон Р.Л., Леонова В.Г., Максимов А.Б. и др.* Результаты совместных полевых сейсмологических исследований 1975 г. в районе хр. Петра Первого. Сб. советско-американских работ по прогнозу землетрясений. Душанбе-М.: Дониш. 1976. Т. 1. Кн. 1. С. 43–69.
- Выбросы многомерных и регрессионных наборов данных. “ГОСТ Р ИСО 16269-4-2017. Национальный стандарт Российской Федерации. Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов” (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 10.08.2017 N 865-ст).
- Гамкрелидзе И. П.* Планетарная трещиноватость дислоцированных толщ и связанные с нею явления // Геотектоника. 1972. № 6.
- Гусев А.А., Палуева А.А.* Первые результаты исследования статистики направлений для пар эпицентров землетрясений-соседей на Камчатке // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7. № 4. С. 529–543. DOI:10.5800/GT-2016-7-4-0221
- Гутенберг Б., Рихтер К.* Сейсмичность Земли. Пер. с англ. М.: ИЛ. 1948 118 с.
- Делемень И.Ф.* Критический обзор алгоритмов, методов и способов выявления пространственно-временной упорядоченности трехмерных точечных множеств локальной и региональной сейсмичности. Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов: Тр. Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 26.09–2.10.2021 г. Петропавловск-Камчатский. 2021. С. 382–386.
- Децерева Е.В., Сидорин А.Я.* Пространственные распределения погрешностей определения координат землетрясений на гармском полигоне // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 2. С. 69–77.
- Децерева А.В.* Программа ABD. [Электронный ресурс]. <https://disk.yandex.ru/d/YMDrgsLkuoV5P> (дата доступа: 05.11.2021).
- Децерева А.В.* Корреляция между временными рядами: что может быть проще? [Электронный ресурс]. <https://habr.com/ru/post/542638/> (дата доступа: 05.11.2022).
- Децерева А.В., Мирзоев К.М., Лукк А.А.* Критерии группирования землетрясений с учетом пространственной неоднородности сейсмичности // Физика Земли. 2016а. № 1. С. 79–97. DOI: 10.7868/S0002333715060022
- Децерева А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я.* Технологии анализа геофизических временных рядов. Часть 2. WinABD — пакет программ для сопровождения и анализа данных геофизического мониторинга // Сейсмические приборы. М.: ОИФЗ РАН. 2016б. Т. 52. № 3. С. 50–80.
- Децерева А.В., Журавлев В.И., Никольский А.Н., Сидорин А.Я.* Программный пакет ABD — универсальный инструмент для анализа данных долговременных наблюдений // НТР. 2016в. Т. 95. № 4. С. 35–48. DOI: 10.21455/std2016.4-6
- Децерева А.В., Сидорин А.Я.* Исследование значимости корреляции электрической активности рыб и электротеллурического поля // Биофизика. 2004. Т. 49. Вып. 4. С. 715–722.
- Децерева А.В., Сидорин А.Я.* Поиск влияния гравитационных приливов на региональную сейсмичность Греции разными методами: 2. Корреляционный анализ // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49. № 1. С. 35–39.
- Децерева А.В., Сидорин А.Я.* Итеративный алгоритм декомпозиции временных рядов на тренд и сезонные колебания и его тестирование на примере вариаций концентрации CO₂ в атмосфере // Геофизические процессы и биосфера. 2021а. Т. 20. № 1. С. 128–151. DOI: 10.21455/GPB2021.1-11
- Децерева А.В., Сидорин А.Я.* Алгоритм адаптивной оценки сезонных колебаний временных рядов и его тестирование на примере вариаций концентрации CO₂ в атмосфере // Геофизические процессы и биосфера. 2021б. Т. 20. № 4. С. 147–174. DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2021.4-10>
- Журавлев В.И., Лукк А.А.* Особенности суточной периодичности слабых землетрясений Ирана // Физика Земли. 2012. № 1. С. 63–81.
- Каттерфельд Г.Н., Чарушин Г.В.* Глобальная трещиноватость Земли и других планет // Геотектоника. 1960. № 6.
- Каттерфельд Г.Н., Чарушин Г.В.* Региональный критерий выявления систем планетарных трещин. Давления и механические напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы. Л.: Недра. 1969.
- Каттерфельд Г.Н., Чарушин Г.В.* Региональных критерий выявления систем планетарных трещин. Геодинамика,

магматизм и минералогия континентальных окраин Севера Пацифики. Материалы Всерос. совещ. Магадан. 2003. Т. 1. С. 55–57.

Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Периоды повышенной вероятности возникновения для возникновения сильнейших землетрясений мира. Математические методы в сейсмологии и геодинамике // Вычислительная сейсмология. Вып. 19. М.: Наука. 1986. С. 48–58.

Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука. 1975.

Костров Б. В., Никитин Л. В. Применение методов теории разрушения к изучению очагов землетрясения. Физические основания поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука. 1970.

Кролевец А.Н., Макеев А.М. Компьютерная программа поиска плоскостей пространственного группирования гипоцентров камчатских землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2011. № 2 (3). С. 69–79.

Кузьмин Ю.О. Современная геодинамика системы разломов // Физика Земли. 2015. № 4. С. 25–30. DOI: 10.7868/80002333715040055

Кузьмин Ю.О. Индуцированные деформации разломных зон // Физика Земли. 2019. № 5. С. 61–75. DOI: 10.31857/S0002-33372019561-75

Кузьмин Ю.О. Современные объемные деформации разломных зон // Физика Земли. 2022. №4. С. 3-18. DOI: 10.31857/S0002333722040068

Лукк А.А. Сейсмическая трещиноватость, эрозивная сеть и напряженно-деформированное состояние Гармского района // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1980. № 3. С. 18–29.

Лукк А.А. Выделение линейных образований в структуре сейсмичности путем вычисления скалярных произведений ближайших во времени пар сейсмических событий // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 3. С. 61–77. <https://doi.org/10.21455/si2022.3-4>

Лукк А.А. Пространственно-временные последовательности слабых землетрясений Гармского района // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 2. С. 25–37.

Лукк А.А., Леонова В.Г. Трещиноватость земной коры Гармского района по статистике механизмов очагов слабых землетрясений // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 8. С. 33–45.

Лукк А.А., Мирзоев К.М. Некоторые оценки напряженно-деформированного состояния земной коры Русской платформы // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 1. С. 70–90. <https://doi.org/10.21455/VIS2020.1-4>

Лукк А.А., Пивоварова Н.Б., Пухначева Т.П. О точности определения координат очагов местных землетрясений. Математические проблемы геофизики. Новосибирск: Наука. 1973. С. 159–167.

Лукк А.А., Турчанинов И.В. Выявление линейных последовательностей эпицентров землетрясений в сейсмическом поле Гармского района // Физика Земли. 1998. № 10. С. 3–21.

Макаров В. И. Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. М.: Наука. 1977.

Макеев А.М., Кролевец А.Н. Применение кластерной технологии к задаче поиска плоскостей группирования гипоцентров землетрясений // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 4. С. 131–135.

Мартынова Г. И. О некоторых особенностях структуры сети планетарных трещин. Давления и механические напряжения в развитии состава, структуры и рельефа литосферы. Л.: Недра. 1969.

Михайлов А. И. Полевые методы изучения трещин в горных породах. М.: Госгеолтехиздат. 1956.

Молчан Г.М., Дмитриева О.Е. Идентификация афтершоков: обзор и новые методы. Современные методы интерпретации сейсмологических данных // Вычислительная сейсмология. Вып. 24. М.: Наука. 1991. С. 19–50.

Мирзоев К.М. Группирование землетрясений Таджикистана // Изв. АН Тадж. ССР. Отд. физ.-мат. и геол.-хим. наук. 1980. № 1(75). Душанбе: Дониш. С. 62–70.

Мирзоев К.М., Азизова А.А. Статистические закономерности группирования коровых землетрясений Таджикистана и прилегающих территорий. Землетрясения Средней Азии и Казахстана в 1981. Душанбе: Дониш. 1983. С. 48–68.

Мирзоев К.М. Методика выделения связанных землетрясений // Докл. АН Тадж. ССР. 1988. Т. XXXI. № 3. С. 182–186.

Переобучение. <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5>. Дата обращения 13.08.2023.

Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Декластеризация потока сейсмических событий, статистический анализ // Физика Земли. 2019. № 5. С. 38–52. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019538-52>

Писаренко В. Ф., Скоркина А. А., Рукавишников Т. А. Как выбрать интервал магнитуд для оценки наклона графика повторяемости // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. С. 1–9. DOI: 10.31857/S0203030623700128

Попандопуло Г.А. Метод одновременного определения координат гипоцентров землетрясений и скоростей сейсмических волн // Экспериментальная сейсмология. М.: Наука. 1983. С. 109–118.

Попандопуло Г.А. Определение координат гипоцентров землетрясений на Гармском геофизическом полигоне. Землетрясения и процессы их подготовки. М.: Наука. 1991. С. 1–23.

Прозоров А.Г. Динамический алгоритм выделения афтершоков для мирового каталога землетрясений. Математические методы в сейсмологии и геодинамике // Вычислительная сейсмология. М.: Наука. 1986. Вып. 19. С. 58–62.

Раутиан Т.Г. Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений // Тр. Ин-та сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Тадж. ССР. 1960. Т. 7. С. 41–86.

Рулев Б.Г. Локализация очага землетрясения в условиях изменения свойств среды во времени. Землетрясения и процессы их подготовки. 1991. М.: Наука. С. 24–35.

- Сидорин А.Я. (ред.).* Гармский геофизический полигон. М.: Наука. 1990. 240 с.
- Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 7–22.
- Студопедия, эллипс погрешностей. https://studopedia.ru/12_18038_ellips-pogreshnostey.html. Дата доступа 01.12.2023.
- Шебалин П.Н.* Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 3–15.
- Шебалин П.Н.* Широкомасштабная краткосрочная активизация сейсмичности перед сильнейшими землетрясениями Японии и Курил // Геофизические процессы и биосфера. 2011. Т. 10. № 1. С. 36–46.
- Шебалин П.Н.* Увеличение радиуса корреляции и цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями // Физика Земли. 2020. № 1. С. 30–42. DOI: 10.31857/S0002333720010135
- Шевченко В.И., Лукк А.А., Гусева Т.В.* Автономная и плейттектоническая геодинамика некоторых подвижных поясов и сооружений. М.: ГЕОС. 2017. 612 с.
- Шульц С. С.* Планетарная трещиноватость по ориентировке некоторых линейных форм рельефа. Л.: Наука. 1965.
- Шульц С. С.* О разных масштабах планетарной трещиноватости // Геотектоника. 1966. № 2.
- Шульц С. С.* Некоторые вопросы планетарной трещиноватости и связанных с нею явлений // Вестн. ЛГУ. 1969. № 6.
- Шульц С. С.* Планетарные трещины и тектонические дислокации // Геотектоника. 1971. № 4.
- Allen C.R.* Active faulting in northern Turkey // Calif. Inst. Tech., Div. Geol. Sci. Contrib. 1969. № 1577.
- Ambraseys N.N.* Some characteristic features of the Anatolian fault zone // Tectonophysics. 1970. V. 9. P. 143–165.
- Bakun W.N., McEvilly T.V.* Recurrence model and Parkfield, California, earthquakes // Journ. Geophys. Res. 1984. V. 89. № 5. P. 3051–3058.
- Cambaz M.D., Turhan E., Yilmazer M., Kekovali K., Necmioglu O. and Kalafat D.* A Review on Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI) Seismic Network and Earthquake Catalog: 2008–2018. ADGEO. 2019. V. 51. P. 15–23. DOI:10.5194/adgeo-51-15-2019
- Console R., Jackson D.D., Kagan Y.Y.* Using the ETAS Model for Catalog Declustering and Seismic Background Assessment // Pure and Applied Geophys. 2010. V. 167. № 6. P. 819–830. DOI: 10.1007/s00024-010-0065-5
- Elie de Boumont L.* Recherches sur quelquesunes de revolutions de la surface du globe // Amer. Sci. Nature. 1929. V. 18.
- Frohlich C., Davis S.D.* Single link cluster analysis as a method to evaluate spatial and temporal properties of earth quake catalogs // Geophys. J. Int. 1990. V. 100. P. 19–32.
- Gardner J., Knopoff L.* Is the sequence of earthquakes in southern California, with aftershock removed, Poissonian? // Bull. Seismol. Soc. Am. 1974. V. 64. P. 1363–1367.
- Hobbs W. H.* Repeating patterns in the relief and the structure of the land // Bull. Geol. Soc. Amer. 1911. V. 22. № 2.
- Knopoff L.* The Statistics of Earthquakes in Southern California // Bull. Seism. Soc. Am. 1964. V. 54. № 6. P. 1871–1873.
- Mogi K.* Migration of seismic activity // Bull. Earthq. Res. Inst. Univ. Tokyo. 1968. V. 46. P. 53–74.
- Ogata Y., Zhuang J.* Space–time ETAS models and an improved extension // Tectonophysics. 2006. V. 413. P. 13–23.
- Prozorov A.G., Dziewonski A.M.* A method of studying variations in the clustering property of earthquakes: Application to the analysis of global seismicity // J. Geoph. Res.: Solid Earth. 1982. V. 87. № B4. P. 2829–2839.
- Reasenber P.* Second-order moment of central California seismicity, 1969–82 // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 5479–5495.
- Savage W.U.* Microearthquake clustering near Fairview Peak, Nevada, and in the Nevada seismic zone // Journal of Geophysical Research. 1972. V. 77. № 35. P. 7049–7056.
- Scholz C.H.* The Mechanics of Earthquakes and Faulting. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge. 2002. 471 p.
- Segall P., Du Y., Thatcher W.* Were the 1934 and 1966 Park field earthquakes similar? // Seismol. Res. Lett. 1990. V. 61. P. 22.
- Sonder R. A.* Mechanik der Erde. Schweizbart. Stuttgart. 1956.
- Stille H.* Uralte Anlage in der Tektonik Europas // Ztschr. d. Deutsch. Geol. Ges. 1947. V. 99.
- Vecchio A., Carbone V., SorrisoValvo L. et al.* Statistical properties of earthquakes clustering // Nonlin. Process. Geophys. 2008. V. 15. P. 333–338. www.nonlin-processes-geophys.net/15/333/2008/
- Vening-Meinesz F. A.* Shear patterns of the earth's crust // Trans. Amer. Geophys. Union. 1947. V. 28.
- Wyss M., Slater L., Burford R.O.* Decrease in deformation rate as a possible precursor to the next Parkfield earthquake // Nature. 1990. V. 345. № 6274. P. 428–431.
- Utsu T.* Aftershock and earthquake statistics (I): Some parameters which characterize an aftershock sequence and their interrelations // J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. 1969. Ser. VII. № 3. P. 129–195.
- Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H.* Clustering Analysis of Seismicity and Aftershock Identification // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 101 (1). P. 1–4.
- Zhuang J., Werner M.J., Hainzl S., Harte D., Zhou S.* Basic models of seismicity: spatiotemporal models. Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. 2011. DOI: 10.5078/corssa-07487583. Available at <http://www.corssa.org>

Spatiotemporal Sequences of Earthquake Epicenters as a Subspecies of Grouped Seismic Events

A. V. Deshcherevskii^{a,*} and A. A. Lukk^{a,**}

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: adeshere@ifz.ru*

^{**}*e-mail: lukk@ifz.ru*

Received September 8, 2023; revised March 9, 2024; accepted March 11, 2024

Abstract — Linear sequences of earthquake epicenters (“chains”) related in space and time are studied. A new approach to understanding earthquake chains as a special kind of group (clustered) events is proposed. It is believed that clusters of group earthquakes with pronounced spatial anisotropy potentially represent the desired chains. Such chains are given the physical meaning of markers of activated tectonic faults. A formalized algorithm for the allocation of linear sequences of earthquake epicenters based on the proposed approach has been developed. The search for chains is conducted in the catalog of group earthquakes. Previously, single earthquakes (i.e., not included in clusters) are removed from seismicity. For this, a previously developed algorithm was used, focused on the selection of any interrelated events, and not only (mainly) aftershock and/or foreshock series (Deshcherevsky et al., 2016a). The proposed method of isolating earthquake chains has been successfully tested on earthquake catalogs of Garm, Iran and central Turkey. Chain maps are provided, and summary statistics of the chain field are discussed. As a rule, these chains can be compared with various tectonic disturbances, but a significant part of them are not tied to known structures. For the Garm district, the continuity of the results obtained with previously performed studies is shown. Like almost any method of analyzing seismic data, the earthquake chain algorithm has a significant number of configurable parameters. Within certain limits, you can vary the criteria for allocating group events, the minimum number of events in the chain and its minimum length, as well as the required level of straightness of the chain. However, all these settings primarily affect the total number of chains found in the catalog, and their location and orientation (azimuths) they almost do not depend on the algorithm settings. This allows us to consider the proposed analysis method as a fundamentally new way of extracting and visualizing information about the spatial and temporal organization of seismicity. A more detailed study of both the structure of earthquake chains and its changes over time in various seismically active regions of the world can contribute to a better understanding of the dynamics of the seismotectonic process.

Keywords: linear sequences of earthquake epicenters (chains) related in space and time, group earthquakes, chain systems, algorithms for analyzing seismic catalogs