

УДК 550.34; 550.343
PACS 91.30 Dk, 91.30 Px

Это препринт Произведения, принятого для публикации в журнале
«Вопросы инженерной сейсмологии». © Яковлев Ф.Л., Стаховская
Р.Ю., Габсатарова И.П., 2023 г.
Электронная ссылка на сайты Издателя – <http://pleiades.online/>

О ЗАКОНОМЕРНОЙ ПЕРИОДИЧНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВОСТОЧНОГО КАВКАЗА ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДВА ВЕКА

Ф.Л. ЯКОВЛЕВ¹, Р.Ю. СТАХОВСКАЯ¹, И.П. ГАБСАТАРОВА²

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

² ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», г. Обнинск, Россия

Автор для переписки: Р.Ю. Стаховская, e-mail: ritta-st@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.11.2022 г.; после доработки 05.02.2023 г.

Принята к публикации 06.02.2023 г.

Аннотация. Более 30 лет назад для восточных регионов Северного Кавказа (Дагестан и Чечня) на площади 300×300 км для периода 1800–1985 гг. на качественном уровне было выявлено существование закономерного квазициклического режима сейсмичности. Закономерность заключалась в том, что уровень сейсмичности в течение одного цикла длительностью 10–30 лет снижался от пикового события (магнитуда 5.0–6.5) до фоновых значений. Затем происходил быстрый рост сейсмичности (в течение 2–3 лет) до следующего пикового события. Это гипотетическое явление было строго проанализировано нами формализованным образом на данных расширенного каталога, включая 2022 г. Полученный результат подтвердил существование закономерного квазициклического изменения уровня сейсмичности в восточной зоне Северного Кавказа как природного явления. Выявленная закономерность может быть применена для среднесрочного прогноза сейсмичности и для тестирования моделей сейсмичности в этом регионе.

Ключевые слова: сейсмичность, Северный Кавказ, квазициклическость сейсмического процесса, среднесрочный прогноз сейсмичности, Рачинское землетрясение

DOI: <https://doi.org/10.21455/VIS2023.2-1>

Цитирование: Яковлев Ф.Л., Стаховская Р.Ю., Габсатарова И.П. О закономерной периодичности сейсмического процесса Восточного Кавказа за последние два века // Вопросы инженерной сейсмологии. 2023. Т. 50, № 2. С. 5–24. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.2-1>

ВВЕДЕНИЕ

Сейсмический процесс всегда проявляется неоднородно как в пространстве, так и во времени. Для понимания такой неоднородности разработаны многочисленные эмпирические и теоретические модели, например, иерархично-блоковая модель М.А. Садовского [Садовский и др., 1987] и линейно-доменно-фокальная (ЛДФ) модель зон возникновения очагов землетрясений В.И. Уломова [Уломов, Шумилина, 1999]. Развитию и использованию иерархично-блоковой модели среды на качественном уровне посвящен ряд работ [Захарова и др., 1989; Рогожин, 2004; Ребецкий, 2008; Гуфельд и др., 2009; Захаров, 2011; Кулинич и др., 2012], в

которых предлагаются различные модели блоковой структуры и неоднородностей литосферы, проясняющие природу движений блоков, источников сейсмического процесса, сейсмического режима литосферы и сильных землетрясений. Такие модели позволяют, по крайней мере, описывать и объяснять неоднородный характер сейсмического процесса.

Существуют также более сложные модели, описывающие взаимные связи деформированных структур разного размера (их иерархические отношения) и связи кинематических схем возникающих деформаций [Гончаров, 1997; Хаин, Гончаров, 2006].

Известно, что В.И. Кейлис-Борок [Keilis-Borok, 1990] сформулировал общее положение в контексте использования иерархического представления среды для прогноза сильных землетрясений: «Литосферу Земли можно рассматривать как иерархию объемов, от тектонических плит до зерен породы. Их относительное движение против сил трения и сцепления осуществляется в значительной степени за счет землетрясений. Движение управляется множеством независимых процессов, сосредоточенных в тонких пограничных зонах между объемами. Пограничная зона имеет аналогичную иерархическую структуру, состоящую из объемов, разделенных пограничными зонами и т.д. В совокупности эти процессы превращают литосферу в большую нелинейную систему, отличающуюся неустойчивостью и детерминированным хаосом. На этом фоне возникают некоторые интегральные грубо усредненные эмпирические закономерности, указывающие на широкий диапазон сходства, коллективного поведения и возможность среднесрочного предсказания землетрясений». Такое представление созвучно идее, развиваемой в настоящей работе.

В работе [Захарова и др., 1989] проведен анализ особенностей сейсмичности Северного Кавказа, а именно – периодического проявления сейсмической активизации в данном регионе. Результаты этого анализа были объяснены с позиций блокового строения земной коры. Авторы рассмотрели распределение эпицентров землетрясений по площади для выбранных зон с учетом разных периодов наблюдений, интервалов магнитуд и энергетической представительности землетрясений и пришли к выводу, что проявление сейсмичности приурочено к определенным зонам. Указывалось, что основные очаги землетрясений отмечаются в районах городов Анапа – Сочи, в Кавказских Минеральных Водах и в районах городов Грозный – Махачкала, однако накопленная статистика позволяла дать характеристику только для двух последних регионов. Были приведены характеристики скоростного разреза этих блоков и наклоны графика повторяемости. Для дагестанской части Северного Кавказа была обнаружена некоторая квазицикличность сейсмического процесса.

Мы решили вернуться к проблеме блоковой сейсмичности Северного Кавказа и к полученным в статье [Захарова и др., 1989] результатам в части квазицикличности сейсмического процесса и еще раз проанализировать ситуацию в данном регионе, используя те же блоки и данные, но применяя более точные и строго прописанные процедуры. Кроме того, мы добавили данные за период, прошедший со

времени получения первичных результатов. Цель нашей работы – получить более точные результаты и проверить, сохранилась ли распалась выявленная ранее закономерность в связи с произошедшими за это время крупными землетрясениями (Спитакским и Рачинским), а также уточнить возможность использования установленной закономерности для среднесрочного прогноза землетрясений.

ХАРАКТЕРИСТИКА СЕЙСМИЧНОСТИ

Северный Кавказ характеризуется самой высокой сейсмичностью в Европейской части России. Сейсмический потенциал Северного Кавказа оценен картами «Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации» ОСР-2015-А и ОСР-2015-В как 8 и 9 баллов соответственно на более чем 30% его территории. Наиболее сейсмоактивна восточная зона Северного Кавказа, охватывающая Терско-Каспийский передовой прогиб и восточную часть альпийского мегантиклинория Большого Кавказа.

Сейсмичность в регионе принято характеризовать параметрами сейсмического режима, под которым обычно понимают пространственно-временное распределение землетрясений различных энергий (магнитуд) [Ризниченко, 1958]. Основными параметрами сейсмического режима являются наклон графика повторяемости b и сейсмическая активность $A_{3,3}$. Первое детальное изучение сейсмического режима рассматриваемой территории было предпринято в связи с необходимостью оценки сейсмической опасности и проведения детального сейсмического районирования (ДСР) в г. Грозный и других населенных пунктах Чеченской Республики [Комплексная..., 1996]. Впоследствии были выполнены еще две оценки сейсмического режима этой территории [Рогожин и др., 2014; Лутиков и др., 2021]. Каждый раз исследования проводились на дополненной каталожной базе. Было установлено, что основные параметры сейсмического режима практически не изменились в 2021 г. по сравнению с 2015 г.: значения параметра b в 2015 и 2021 гг. были близки (0.964 ± 0.013 и 0.957 ± 0.013 соответственно), а среднее отклонение значений в ячейках матрицы $A_{3,3}$ 2021 г. от таковых в ячейках матрицы $A_{3,3}$ 2015 г. составило приблизительно 13% [Лутиков и др., 2021]. Такие небольшие различия можно объяснить повышением чувствительности сейсмической сети на территории Восточного Кавказа.

Далее будет показано, что 2015 г. и 2021 г. находятся в одном временном цикле и, тем самым, параметры сейсмического режима для них как раз и должны приблизительно совпадать. Этого не скажешь о параметрах сейсмического

режима в 1996 г. ($b = 1.041 \pm 0.014$), который входит в другой временной цикл, нежели 2015 и 2021 гг. [Яковлев и др., 2021].

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Настоящее исследование проведено на основе собранных в единый каталог землетрясений Кавказа, представленных в базе данных «Сильные землетрясения и афтершоковые последовательности Кавказа» [Габсатарова, Борисов, 2017, 2018]. Объединенный каталог землетрясений содержит сведения о 89 270 землетрясениях с 550 г. до н.э. по 2016 г., эпицентры которых расположены в области $38-48^\circ$ с.ш., $36-51^\circ$ в.д. Разумеется, каталог, охватывающий столь значительный временной интервал, неоднороден как по уровню представительности, так и по точности определения координат и магнитуд событий. Отметим, что каталог был унифицирован по магнитуде, условно названной M , аналогичной магнитуде по поверхностной волне (M_s , M_{LH}), с использованием ряда пересчетных формул [Габсатарова, Борисов, 2017, 2018]. Согласно сведениям об истории инструментальных сейсмологических наблюдений на Кавказе и состоянию сети станций [Габсатарова и др., 2008], выделяются следующие периоды с магнитудами представительных землетрясений: до 1901 г. (исторический) с $M = 6.0$; 1902–1917 гг. (начало инструментальных наблюдений на Кавказе) с $M = 4.7$; 1918–1945 гг. (постреволюционное время и годы войн) с $M = 4.5$; 1946–1961 гг. с $M = 4.3$; 1962–1983 гг. (период функционирования высокочувствительных региональных станций, оснащенных аналоговой аппаратурой) с $M = 3.0$; 1984–1991 гг. (период начала внедрения цифровой аппаратуры на отдельных станциях) с $M = 3.0$; 1992–2004 гг. с $M = 3.0$; с 2005 г. по настоящее время (расширение сетей Армении, Azerbaijan, Грузии и Северного Кавказа) с $M = 2.5$.

Краткая характеристика сети. К концу 1990 г. сейсмическая сеть Кавказской зоны Единой системы сейсмических наблюдений (ЕССН) состояла из 100 станций [Папалашвили, Чичинадзе, 1999]. Основная часть сейсмических станций была расположена на территории Грузии, Армении, Azerbaijan и Дагестана; лишь незначительная их часть находилась на остальной территории Северного Кавказа [Кондорская, Федорова, 1996]. Период распада сети ЕССН на Кавказе продолжался вплоть до начала 2000-х годов, после чего получает постепенное развитие процесс модернизации сети за счет размещения цифрового оборудования на «старых» станциях и открытия новых станций, оснащенных цифровым оборудованием, с обязательной передачей записей в локальные

и региональные центры сбора и обработки. В Национальной сейсмической сети Грузии (Институт наук о Земле и национальный Центр сейсмического мониторинга) такой период начался с 2003 г. В настоящее время непрерывные потоки цифровых записей собираются в Центре сбора и обработки в режиме, близком к реальному времени, с 25 станций [Tumanova et al., 2016]. В Национальной службе сейсмической защиты (NSSP) Армении в настоящее время работают 42 сейсмические станции; уровень представительной регистрации землетрясений в 2013 г. равен $K_{3min} = 8.0$ для всей территории Армении и за ее пределами [Саргсян и др., 2019]. Почти столько же станций находится в распоряжении Республиканского Центра Сейсмологической службы Azerbaijan [Етирмишли и др., 2019]. На Северном Кавказе в настоящее время работает 60 станций [Габсатарова и др. 2020].

Большую часть каталога составляют региональные данные после 1991 г. Основной объем каталогов связан с ежегодниками «Землетрясения в СССР», «Землетрясения Северной Евразии», «Землетрясения России» и каталогами, публикуемыми в Международном сейсмологическом центре (ISC). Реализация сейсмического процесса на Кавказе во времени представлена на рис. 1.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА ФОРМАЛИЗОВАННОГО АНАЛИЗА

В первоначальных наблюдениях [Захарова и др., 1989] были сделаны выборки землетрясений из каталога ОМЭ ИФЗ АН СССР для 8 участков прямоугольной формы (полигонов) разного размера с общим центром около г. Грозный (рис. 2). Выбор границ участков был произвольным, слабо связанным с сейсмической активностью; прямоугольная форма была удобна для процедуры выборки из машинного каталога. На первом этапе настоящего проекта мы следуем вслед за первичным исследованием [Захарова и др., 1989] и используем те же границы полигонов с целью подтвердить само явление квазипериодичности. При дальнейшем развитии исследований выбор участков и поиск оптимального полигона планируется проводить с учетом кластеризации сейсмической активности.

В первоначальном исследовании [Захарова и др., 1989] по этим 8 выборкам были построены графики, которые по времени охватывали отрезок от 1800 до 1985 гг., т.е. общая длительность последовательностей составила приблизительно 155 лет. Выборки были визуализированы в виде графиков «время–магнитуда» (рис. 3, а, в). Поверх этих графиков были нанесены линии, состоящие из отрезков протяженностью в 3–10 лет и соединяющие положения

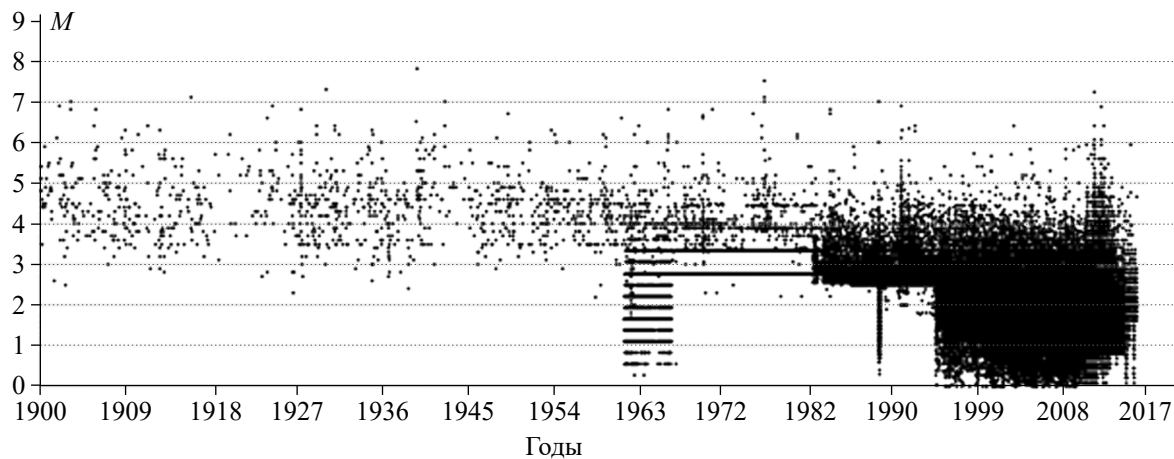


Рис. 1. Реализация сейсмического процесса на Кавказе во времени

Отображены данные из БД «Сильные землетрясения и афтершоковые последовательности Кавказа» [Габсатарова, Борисов, 2018] в рамках области 38–48 °N, 35–51 °E (с исторических времен по 2017 г.)

сейсмических событий с некоторой максимальной магнитудой, произошедших примерно за это время. При отсутствии событий линии не проводились. В результате на графиках получилась ломаная линия, огибающая сверху поле сейсмических событий и показывающая некоторую квазипериодичность. По максимумам этой ломаной линии замерялись значения магнитуды и длительности каждого квазицикла (рис. 3, б). На рис. 3, а, в видно, что цикличность для полигонов 5 и 6 очень близка, но не идентична. Для выбранных полигонов была определена корреляция значений «магнитуда – длительность от одного максимального события до другого» (рис. 4); для некоторых из них она оказалась очень высокой, что позволило нам прийти к выводу, что такая длительность квазицикла (время от основного пикового события до следующего) связана с магнитудой пикового события, а график уменьшения магнитуды событий внутри цикла может иметь некоторый постоянный наклон.

«Физический» смысл выявленной ранее закономерности [Захарова и др., 1989] состоит в том, что сейсмические события меньшей магнитуды, под огибающей линией, могли происходить, а более сильные, выше этой линии, не происходили. Следовательно, самые сильные события могли происходить не в любое время, а только в определенные моменты. Заметим здесь, что под понятием «наиболее сильное землетрясение» для краткости изложения здесь и далее авторы понимают «наиболее значительное по магнитуде», поскольку интенсивность в эпицентре в настоящей статье не рассматривается. Кроме того, была также отмечена заметная асимметричность отмеченных циклов во времени: уменьшение магнитуды событий

от пикового до некоторого «фоновое» уровня происходило заметно медленнее, чем его быстрое нарастание вновь до максимального. На следующем шаге были измерены отрезки времени от текущего пикового события до следующего такого события для каждого полигона. Фактически считалось, что текущее максимальное событие квазицикла было его началом, а продолжался он до следующего максимального события, которое начинало уже новый квазицикл.

Было определено, что для некоторых полигонов коэффициент корреляции этих пар значений, «магнитуда – отрезок времени», оказался очень высоким – до 0.96 (рис. 5). При дополнительном анализе было обнаружено, что величина корреляции, т.е. яркость проявления указанной закономерности, зависела от площади полигона: она была малой при малой площади, увеличивалась при средней и опять уменьшалась при большой. Было найдено, что указанные связи наилучшим образом проявлены для полигонов 5 и 6 (см. рис. 5, а), имеющих площадь $2^\circ \times 3^\circ$ и $3^\circ \times 3.5^\circ$ соответственно (при предполагаемой идеальной площади $3^\circ \times 3^\circ$ [Захарова и др., 1989]), т.е. наибольших значений коэффициент корреляции достигал при размере блока примерно $3^\circ \times 3^\circ$. Таким образом, можно предположить, что размер блока $3^\circ \times 3^\circ$ представляет собой тот оптимальный размер, при котором закономерность проявлена наиболее чисто: при меньшем размере данных оказывается недостаточно, а при большем – добавляется некоторый «шум» от соседних блоков, который маскирует существующую закономерность.

Наиболее слабым местом приведенных выше построений является интуитивный, «авторский»

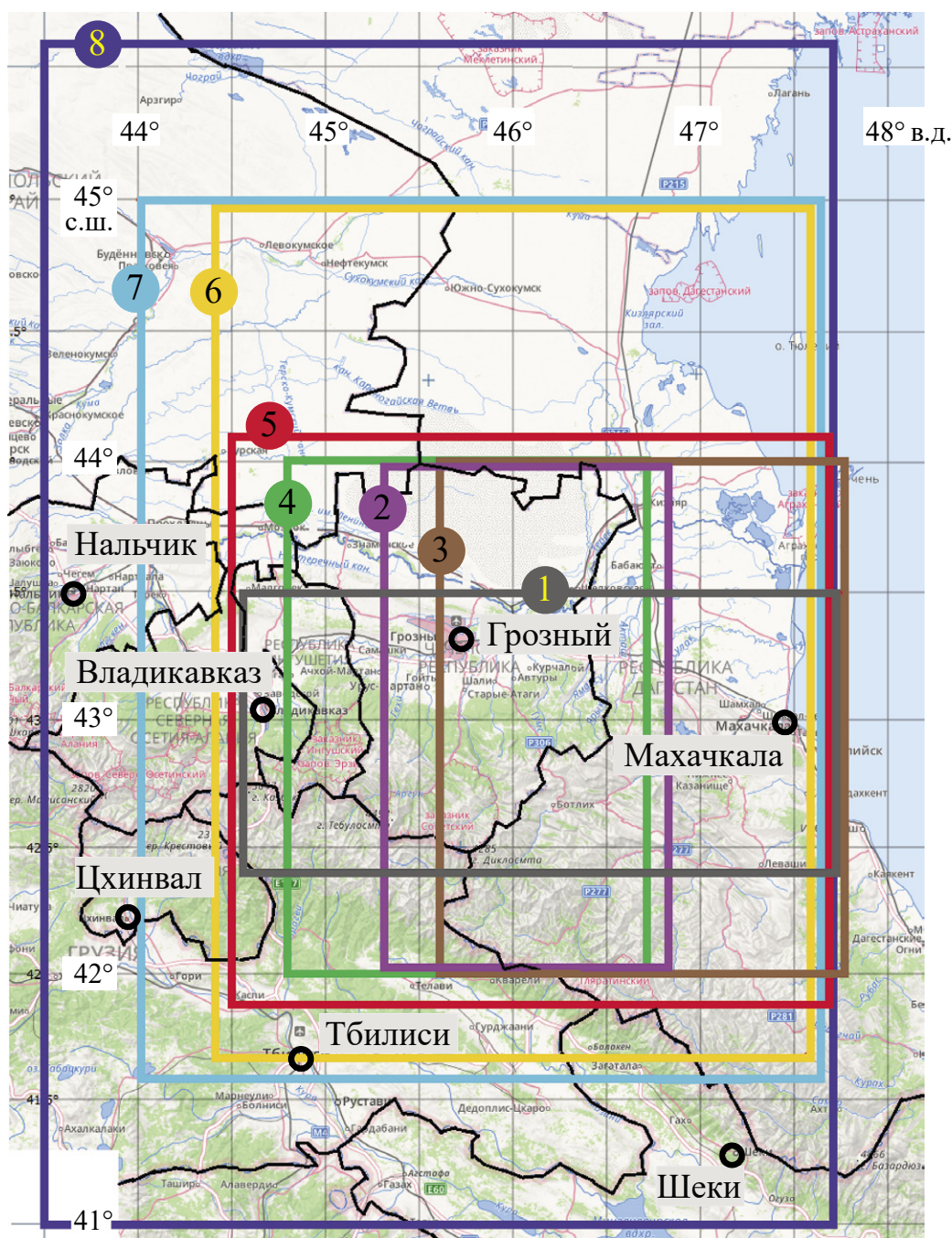


Рис. 2. Границы полигонов 1–8 на карте дагестанской части Северного Кавказа ([Яковлев и др., 2020], по материалам публикации [Захарова и др., 1989])

характер построения огибающей линии. В нашей работе для проверки построений мы использовали более точные процедуры, поскольку нам заранее известны сценарий процесса, наклон графика снижения уровня сейсмичности со временем, а также уровень фоновой сейсмичности, при достижении которого происходит смена цикла (он определен нами [Яковлев и др., 2020] по результатам [Захарова и др., 1989] как $M = 4.0$,

см. рис. 4). Заметим, что этот уровень не всегда совпадает с уровнями представительных магнитуд для рассматриваемого района: до 1961 г. он занижен, а с 1962 г. значительно завышен, что несколько снижает точность построений, но не влияет на общую выстроенную модель.

Для подтверждения или опровержения полученных ранее выводов были разработаны процедуры формализованного отбора событий

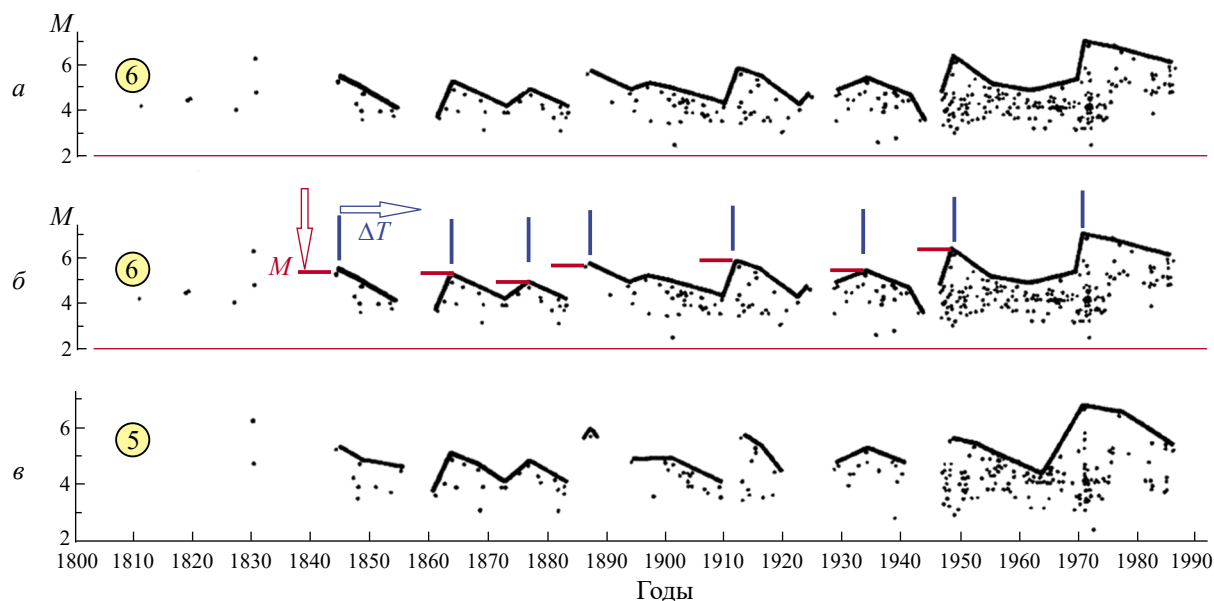


Рис. 3. Данные предварительного анализа квазипериодичности (по [Захарова и др., 1989])

a – построение огибающей линии для полигона 6; *b* – определение значений «магнитуда M – длительность цикла ΔT » для пиковых событий полигона 6; *v* – построение огибающей линии для полигона 5

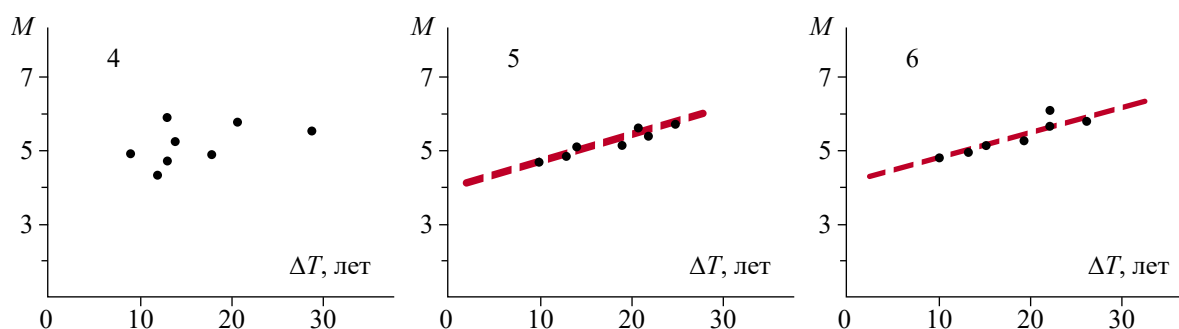


Рис. 4. Определение корреляций значений «магнитуда землетрясения M – длительность цикла ΔT » для полигонов 4, 5, 6 (по [Захарова и др., 1989], с дополнениями)

из материала каталога и объединения их в «эпизоды» квазипериодического сейсмического процесса.

Прежде всего, поскольку исходная «интуитивная» версия сейсмических циклов строилась на огибающей линии и выделении пиковых событий (см. рис. 3), не следовало включать в анализ все события из каталога подряд. Было принято решение, что достаточно включить в последовательность по одному наиболее сильному событию за календарный год (см. рис. 4). Так как наименьший по продолжительности цикл был равен 10 годам, событий с такой частотой, при их наличии, было достаточно для выявления цикличности. В результате такого

отбора был сформирован новый субкаталог значительно меньшего объема.

На втором этапе на базе сокращенного каталога (1 максимальное событие за 1 год) с использованием программы выборки были сформированы восемь субкаталогов второго уровня для координат тех же восьми полигонов, что и в первоначальной работе. По свойствам общего каталога количество событий в XIX в. было заметно меньше, чем в XX и XXI вв., но тем не менее их оказалось достаточно много – не меньше четырех с магнитудой более 4 для каждого эпизода, чего было достаточно для выделения двух-трех эпизодов квазипериодичности на протяжении XIX столетия.

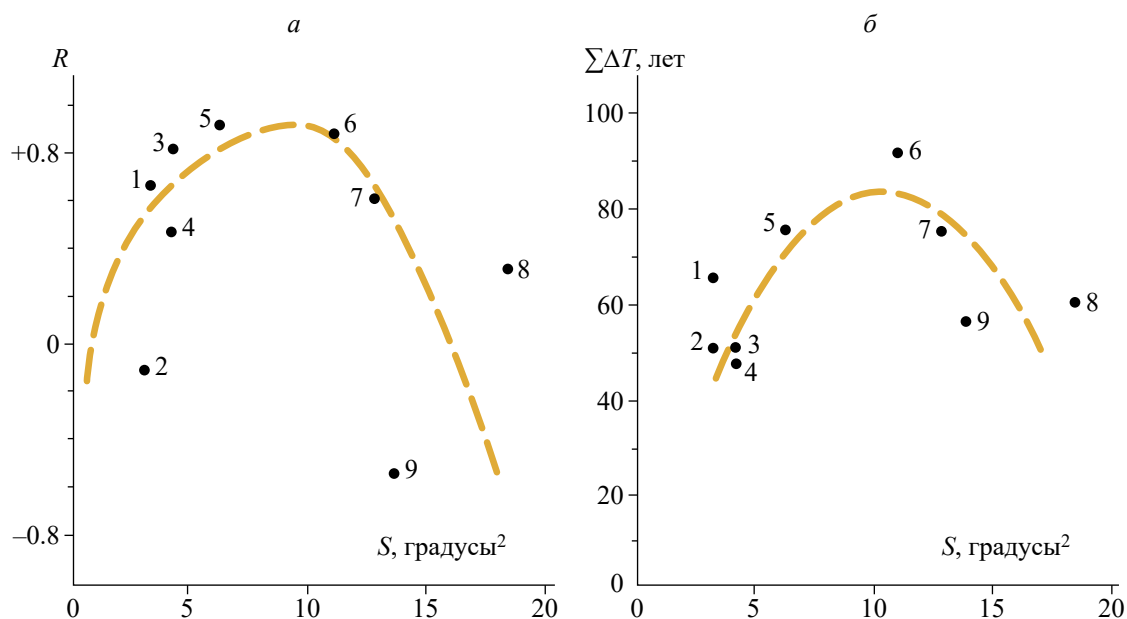


Рис. 5. Зависимость коэффициента корреляции R (а) и суммарной длительности повторяемости пиковых событий $\Sigma\Delta T$ (б) от площади S полигона (по [Захарова и др., 1989; Яковлев и др., 2020])

На следующем, третьем, этапе для всех восьми полигонов были построены графики «магнитуда–время». Например, на рис. 6 представлен график «магнитуда–время» для каталога «наиболее значительное по магнитуде событие за год» для полигона 8. Эти графики аналогичны по смыслу тем графикам, которые использовались в первоначальной работе.

На четвертом этапе проводилась интерпретация графиков. Для этого были использованы результаты первоначальной работы [Захарова и др., 1989], причем нами была принята гипотеза, что в проявлении сейсмичности существует строгое соответствие определенному графику постоянного уменьшения магнитуды событий со временем. Для определения наклона такого графика был использован случай полигона номер 5 (рис. 7), имеющего наилучший коэффициент корреляции.

Идея состояла в том, чтобы отобрать в субкаталог третьего уровня те события, которые лежат на линии с таким наклоном или находятся близко к этой линии. При этом, имея в виду, что природа вряд ли будет очень строго следовать такой закономерности, а также то, что точность определения магнитуд может быть относительно невысокой, рядом с линией уменьшения магнитуды были проведены две линии, сформировавшие коридор с отклонением по оси магнитуд 0.3 как в одну, так и в другую сторону, т.е. 0.6 в сумме (рис. 7, рис. 8), внутри которого могли находиться события,

подчинявшиеся гипотетической закономерности. Наклон основной линии соответствовал уменьшению энергии землетрясений с $M = 6.3$ до $M = 4.0$ за 30 лет, т.е. $\Delta M = -0.077$ за 1 год. Эта линия с коридором вокруг нее (нисходящие наклонные полосы, см. рис. 8) накладывалась на график «магнитуда–время» и совмещалась с пиковым событием таким образом, чтобы в коридор соответствующего эпизода попало возможно большее число событий и чтобы при этом, по возможности, не было отскоков, т.е. событий с магнитудой выше этого коридора; предполагалось, что подобный отскок свидетельствует о нарушении упомянутой закономерности. Длительность эпизода устанавливалась от пикового события до точки пересечения проведенной линии с уровнем фоновой сейсмичности. Между выделенными эпизодами, состоящими из пикового события и линии уменьшения магнитуды землетрясений со временем до фоновых значений, нами выделялись короткие периоды нарастания магнитуды землетрясений от фона до пикового значения (полосы б на рис. 7, 8). В первоначальном исследовании [Захарова и др., 1989] такие периоды фактически завершали очередной квазицикл; нами, напротив, такие периоды в эпизоды снижения магнитуды землетрясений не включались.

Затем еще в один субкаталог вручную отбирались события, которые попали в коридор, а также те, что находились выше коридора

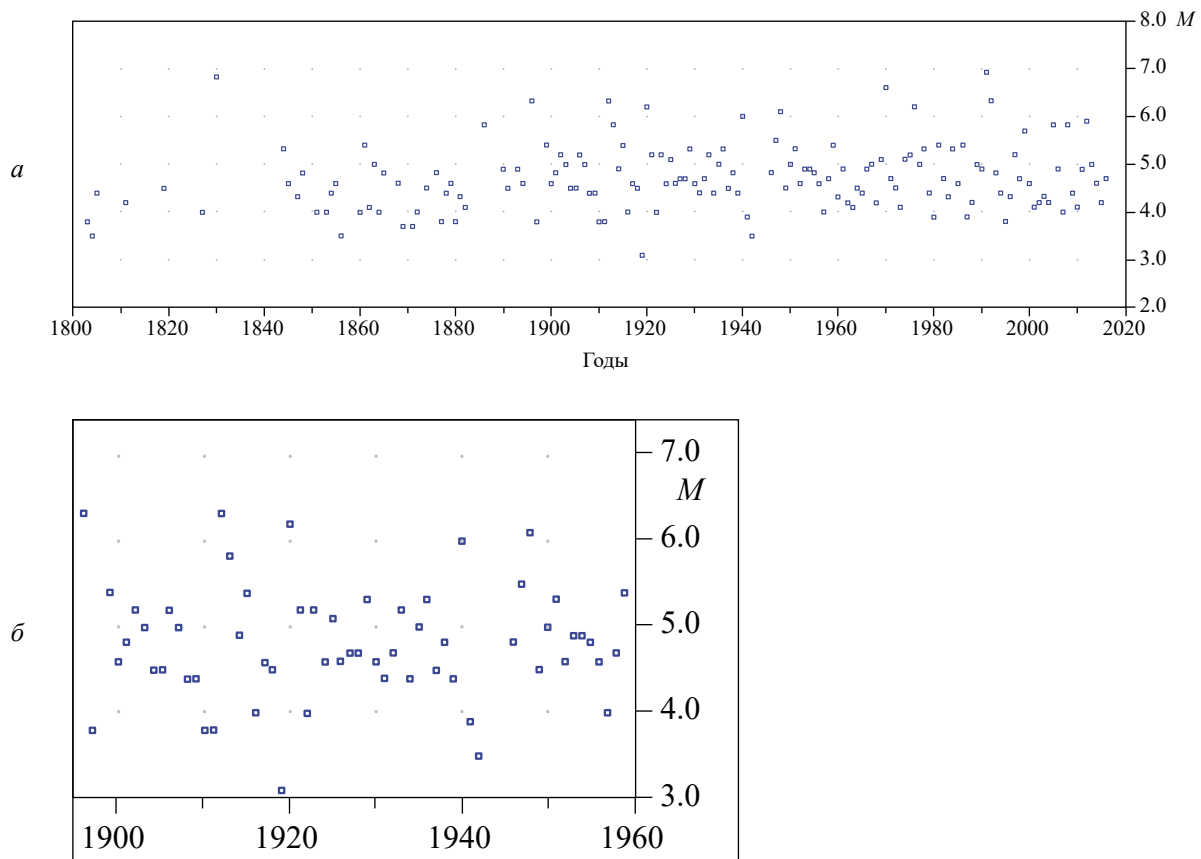


Рис. 6. График «магнитуда–время» для каталога наиболее сильных событий за год для полигона 8
 а – полный график за 1800–2020 гг.; б – увеличенный фрагмент графика

(3, 4 на рис. 7). Для каждого выделенного эпизода принималось положительное или отрицательное решение в отношении полного совпадения или несовпадения сейсмических событий (время и магнитуда) с принятой гипотезой. Если в конкретном эпизоде событий выше коридора не было, решение было положительным, если же обнаруживались отскоки (наличие событий выше коридора), решение выносилось отрицательное (7 на рис. 7, 8). В табл. 1 показана разбивка эпизодов на «позитивные» (совпадающие с моделью) и «негативные» (не совпадающие с ней).

В последнем субкаталоге вводился новый параметр: для каждого эпизода назначался «ноль» шкалы времени (год конца эпизода), при котором линия уменьшения магнитуды упиралась в линию фонового значения ($M = 4.0$). В соответствии с этим для более ранних событий в эпизоде вычислялось время, оставшееся до конца эпизода. Совокупность пар значений «магнитуда – время» в этих субкаталогах по физическому смыслу аналогична графику «магнитуда–время» (см. рис. 3), по которому

была выделена квазипериодичность [Захарова и др., 1989].

На следующем этапе было желательно получить подтверждение вывода об оптимальном размере полигона, на котором наилучшим образом проявляется исследуемая квазипериодичность. Однако сделать это, используя значения коэффициента корреляции по аналогии с полученным ранее результатом [Захарова и др., 1989], не удастся (под коэффициентом корреляции R здесь понимается зависимость значения магнитуды событий внутри заданного нами коридора от времени при ее снижении от пикового значения до фонового). Это связано с тем, что с самого начала, при отборе материала, нами уже был задан наклон коридора значений, что обусловило появление только сильных корреляций по параметрам «магнитуда – время до конца эпизода» для всех полигонов (в наших данных R изменялся от 0.87 до 0.98). Поэтому для определения размера оптимального полигона мы использовали суммарные длительности позитивных эпизодов. Параметр «суммарная длительность эпизодов»

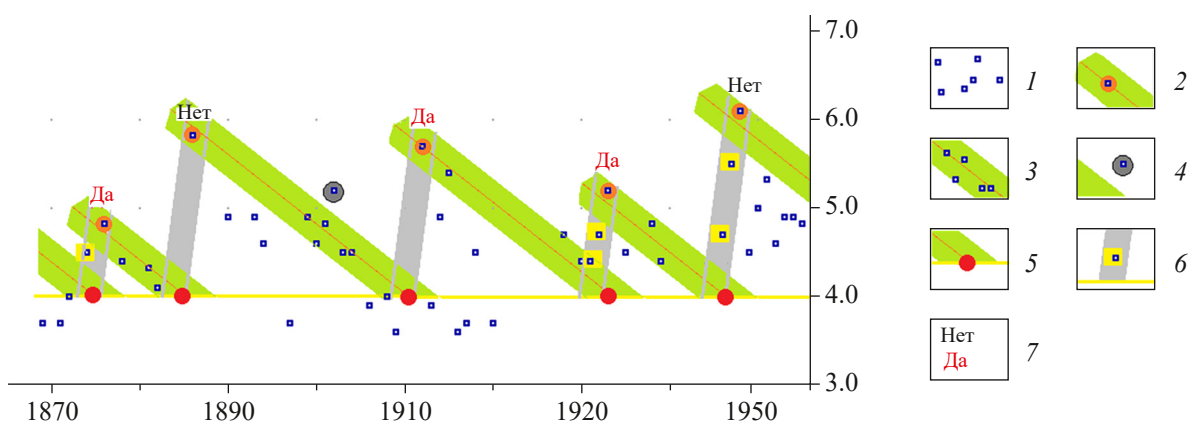


Рис. 7. Квазипериодичность на графике «магнитууда–время» для полигона 5, общий вид

1 – события из каталога «наиболее сильное землетрясение за год» для полигона; 2 – пиковые события соответствующих эпизодов, линии теоретического графика снижения магнитуды землетрясений и полосы разрешенных отклонений ($0.5M$); 3 – события из каталога, попадающие на теоретический график снижения магнитуды землетрясений и вошедшие в субкаталог третьего уровня; 4 – «отскоки» (события из каталога, находящиеся выше теоретического графика снижения магнитуды землетрясений); 5 – завершения эпизодов (достижение уровня фоновой сейсмичности $M=4$ графиком снижения магнитуды землетрясений); 6 – периоды нарастания магнитуды событий перед следующим эпизодом и землетрясения в эти периоды; 7 – решение по эпизоду: «да» – последовательность землетрясений в эпизоде совпадает с гипотезой, отскоков нет, «нет» – имеют место отскоки, последовательность землетрясений в эпизоде не совпадает с гипотезой

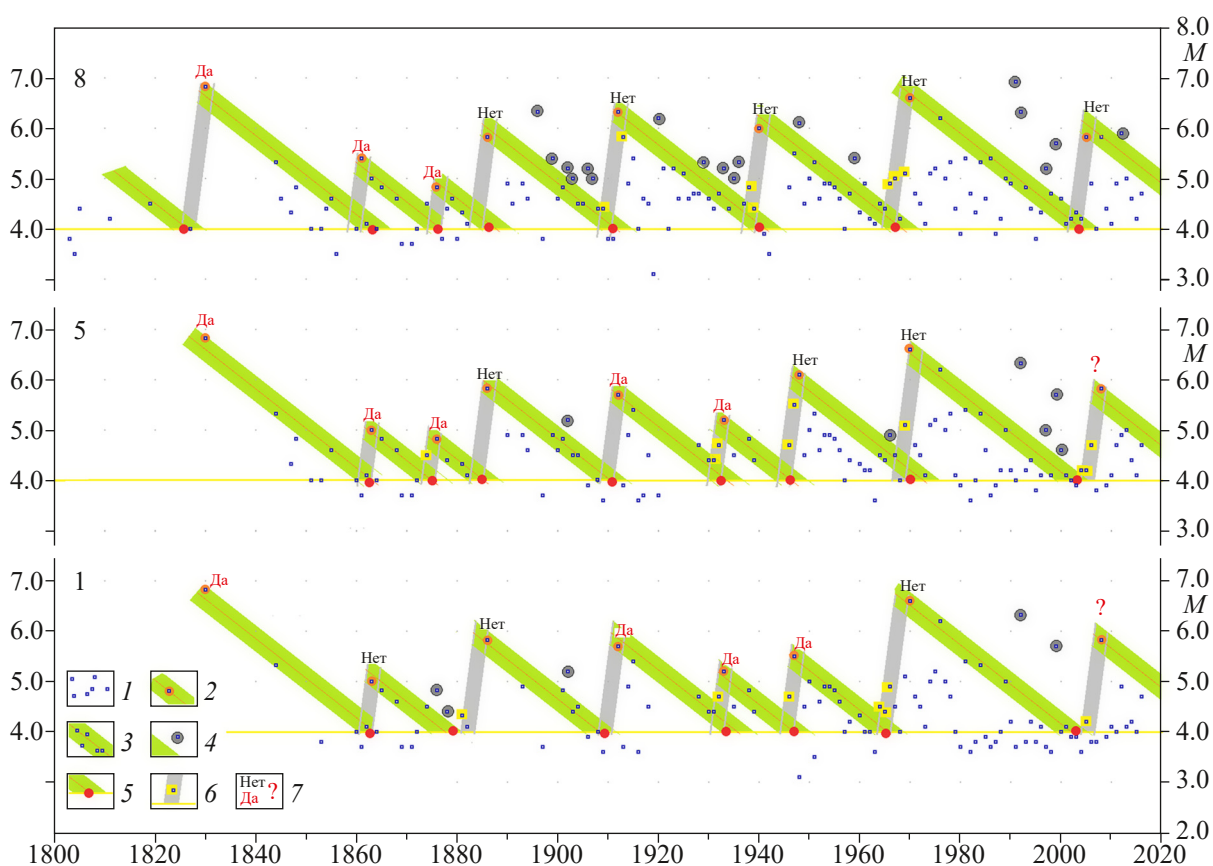


Рис. 8. Графики «магнитууда – год события» с выделением эпизодов для полигонов 8 (а), 5 (б) и 1 (в)

1–6 – как на рис. 7; 7 – решение по эпизоду: «да» – последовательность землетрясений в эпизоде совпадает с гипотезой, отскоков нет, «нет» – имеют место отскоки, последовательность землетрясений в эпизоде не совпадает с гипотезой, «?» – эпизод не закончен, решение не определено

Таблица 1. Разделение некоторых эпизодов для полигона 5 на позитивные (все землетрясения совпадают с гипотезой) и негативные (есть «отскоки» – события, не совпадающие с гипотезой). Решение по эпизоду показано в строке конца эпизода (длительность 0, магнитуда обозначена как «–»). Жирным шрифтом выделены начала эпизодов

Год события	Магнитуда	Длительность до конца эпизода, годы	Решение для события и для эпизода
1876	4.8	9	пиковое
1878	4.4	7	совпадение
1881	4.3	4	совпадение
1882	4.1	3	совпадение
1885	–	0	Позитивное
1886	5.8	24	пиковое
1899	4.9	11	совпадение
1900	4.6	10	совпадение
1901	4.8	9	совпадение
1902	5.2	8	отскок
1903	4.5	7	совпадение
1904	4.5	6	совпадение
1908	4.0	2	совпадение
1910	–	0	Негативное
1912	5.7	20	пиковое
1915	5.4	17	совпадение
1928	1.7	4	совпадение
1930	4.4	2	совпадение
1931	4.4	1	совпадение
1932	–	0	Позитивное
1933	5.2	12	пиковое
1938	4.8	7	совпадение
1939	4.4	6	совпадение

показывает заметно различающиеся значения в зависимости от площади полигонов.

В табл. 2 представлены коэффициенты корреляции (только для позитивных эпизодов) и полученная в результате общая длительность позитивных эпизодов для разных полигонов, а также связь общей длительности позитивных циклов с площадью полигонов. Здесь мы видим, что наибольшая суммарная длительность выявленных эпизодов квазипериодичности наблюдается для полигонов 5 и 6, что подтверждает вывод об оптимальном размере блока ($3^\circ \times 3^\circ$), для которого наилучшим образом

проявляется квазипериодичность (рис. 9, а). Последовательность точек здесь имеет в целом плавный характер и напоминает аналогичный график, полученный ранее (рис. 9, б). Таким образом, используя данные проведенного формализованного анализа, нам удалось подтвердить наличие вполне определенного изменения уровня сейсмичности внутри «квазипериодов» («теоретический» график падения максимально возможных магнитуд со временем, см. рис. 7), а также то, что оптимальный размер блока, для которого наблюдается такая квазипериодичность, приблизительно равен $3^\circ \times 3^\circ$.

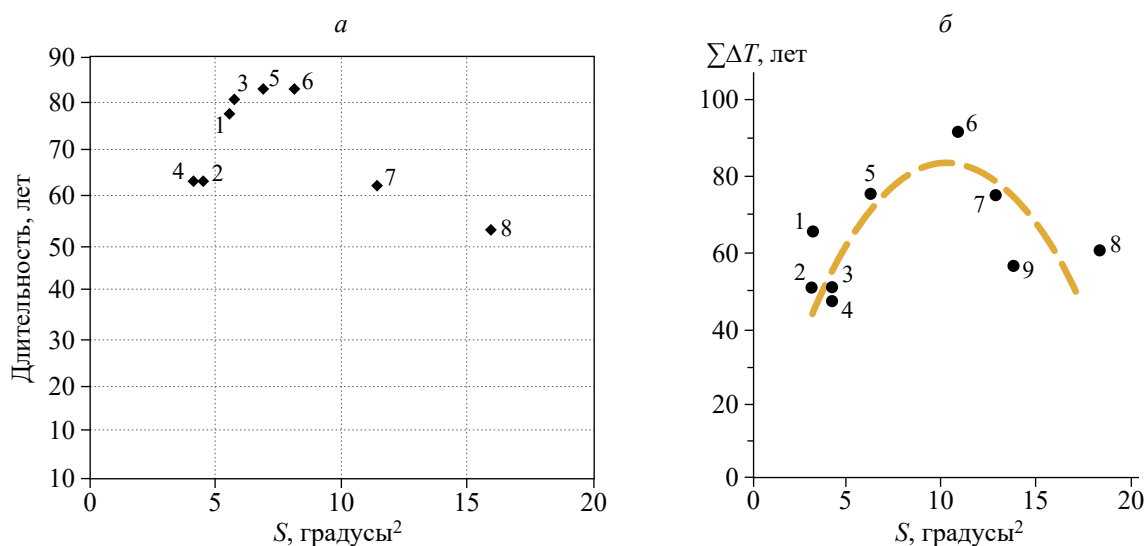


Рис. 9. Определение лучшего случая квазипериодичности по суммарной длительности только положительных решений

а – настоящее исследование (по [Яковлев и др., 2020]); *б* – по [Захарова и др., 1989]. Цифрами обозначены номера полигонов

Таблица 2. Суммарная длительность эпизодов (учитывались только позитивные эпизоды), коэффициенты корреляции R и площади полигонов (в градусах топографической сетки)

Полигон	Суммарная длительность	R	Площадь, градусы ²
1	77	0.96	5.7
2	63	0.98	4.52
3	80	0.97	5.8
4	63	0.87	4.3
5	83	0.96	6.91
6	82	0.95	8.14
7	62	0.98	11.47
8	53	0.97	15.96

ОБСУЖДЕНИЕ: О ПРИРОДНОМ ХАРАКТЕРЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ, ВЛИЯНИИ РАЧИНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА

На последнем описанном выше этапе исследования оставался неразрешенным существенный вопрос: является ли предложенная на основе ранее полученного интуитивного решения квазипериодичность природной или же она представляет собой явный или неявный артефакт? Для разрешения данной проблемы были дополнительно проанализированы данные полигона 5, на котором периодичность проявлена наиболее чисто. Для этого из основного

каталога сначала были удалены все события с магнитудой менее 4. Затем все эпизоды были сведены вместе с использованием параметра «время до конца эпизода»; на графике «магнитуда–время» это выглядит как совмещение всех эпизодов (и позитивных, и негативных) по времени «0» справа (рис. 10, *а*). При этом на графике возник треугольный ареал точек, в котором ближе к времени «0» и ближе к магнитуде 4 количество событий заметно возрастает. Все «отскоки», числом 6, оказались здесь выше и правее «коридора». Исследование статистических свойств массива показало наличие линии регрессии, имеющей наклон в промежутке

между наклоном «коридора» и осью магнитуд, с уравнением вида:

$$T = 6.9315M - 19.302, \quad (1)$$

где M – значения магнитуды; T – время в годах.

Доверительные интервалы 0.95 для этой линии регрессии образуют достаточно узкий диапазон отклонений от самой линии регрессии (рис. 10, а). Чтобы понять, насколько 6 «отскоков» искажают идеальную статистическую картину предполагаемой квазипериодичности, мы проанализировали массив, из которого эти «отскоки» были удалены (рис. 10, б), т.е. кроме «реального» массива (рис. 10, а) был сформирован «идеальный». Уравнение для линии регрессии в этом случае имеет вид:

$$T = 8.3808M - 25.152. \quad (2)$$

Оказалось, что в «идеальном» массиве комбинация наклона линий регрессии и доверительных интервалов такова, что линия

регрессии «реального» массива лежит в пределах доверительных интервалов «идеального» массива и наоборот (см. рис. 10), в том числе и в зоне больших значений магнитуды (более 6). Линия регрессии в обоих случаях пересекает линию фоновой магнитуды, разумеется, не в точке «0» шкалы времени, а в точке, близкой к значению 8 лет. Здесь надо заметить, что разница в наклонах теоретического графика падения магнитуды со временем и линии регрессии в обоих случаях связана с тем, что облако точек имеет треугольную форму, а не линейно вытянутую. При этом коэффициенты корреляции оказались достаточно высокими – 0.49 для «реального» варианта и 0.59 для «идеального»; это означает, что наличие «отскоков» влияет на статистические свойства массива относительно слабо.

Для проверки статистических свойств теоретически возможного массива данных, в котором периодичности установленного характера не существует, но основные свойства

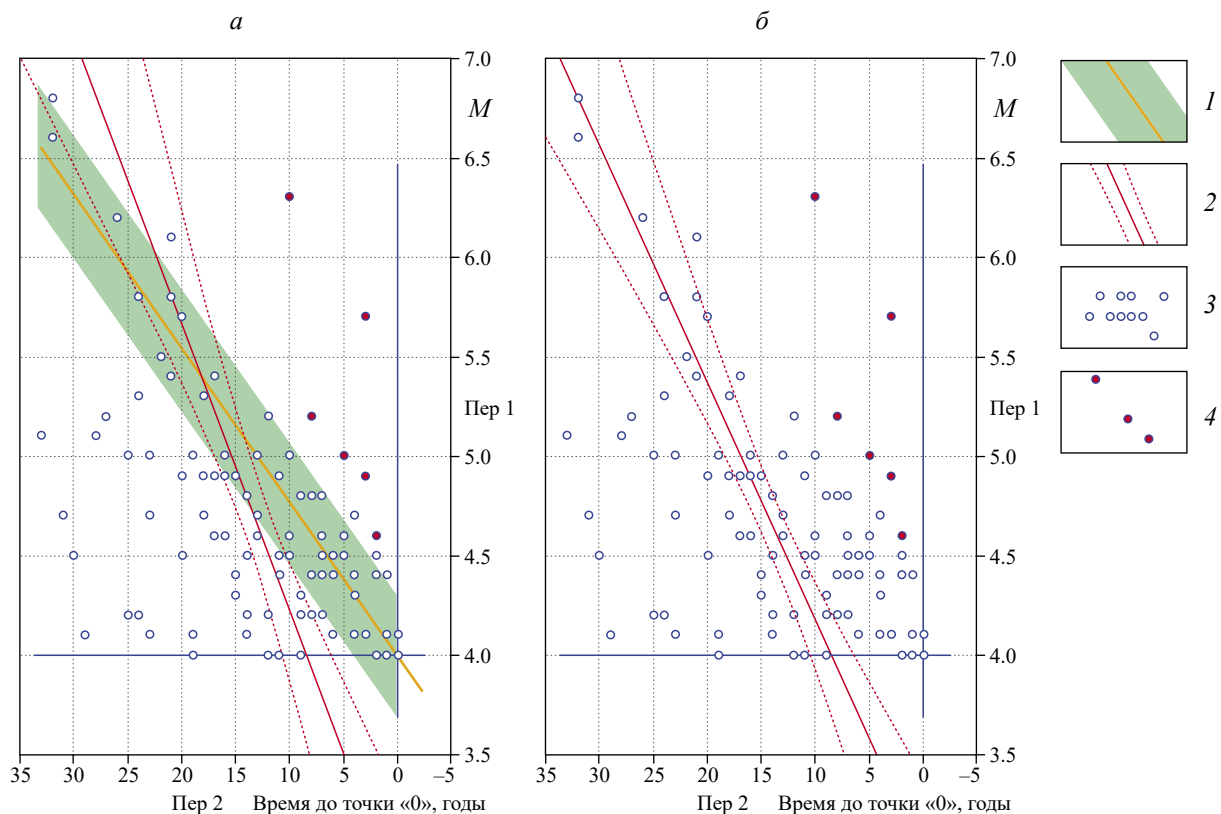


Рис. 10. Суммарные массивы квазипериодичности всех событий магнитудой выше 4 для полигона 5: а – «реальный» вариант с «отскоками» (по [Яковлев и др., 2020], с изменениями); б – «идеальный» вариант без «отскоков»

1 – линия наклона графика падения магнитуды со временем и «коридор» возможных отклонений от нее ($\Delta M = 0.3$ в обе стороны); 2 – линия регрессии и доверительные интервалы 0.95; 3 – сейсмические события, лежащие в разрешенных пределах; 4 – «отскоки» (сейсмические события, выходящие за разрешенные пределы)

проявления сейсмичности сохранены, из имеющегося каталога по полигону 5 был создан массив, в котором периодичность была прямо назначена с периодом 25 лет, начиная с 1830 г.; это означает, что эмпирически найденная квазипериодичность игнорировалась. В результате возникла последовательность сейсмических событий (названная нами «хаотической»), возникающих случайно относительно предполагаемой реальной квазипериодичности (рис. 11). В рамках полученной последовательности магнитуда распределена равномерно по времени, с обычным частотным распределением событий по их энергии (большая магнитуда встречается

намного реже, чем малая). Средние значения параметров «хаотического» массива составили: $M = 4.7$; $T = 11.7$ лет. Использование того же статистического приема – определения линии регрессии с доверительными интервалами – указало на существование для этого массива линии регрессии, параллельной оси магнитуд и перпендикулярной оси времени, т.е. выявило полное отсутствие как зависимости от времени, так и периодичности (см. рис. 11). Таким образом, сравнение статистических параметров массивов событий для полигона 5 в качестве лучшего, попадающих в разрешенный коридор («позитивные» и «негативные» вместе)

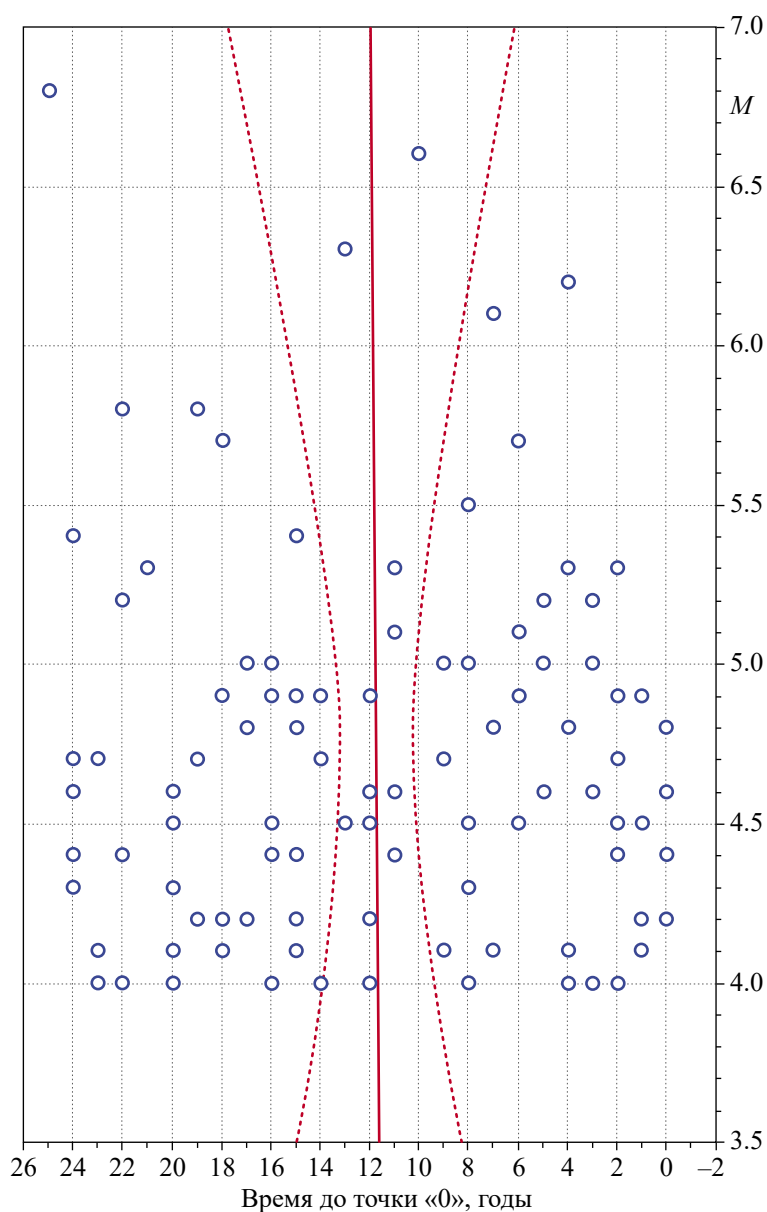


Рис. 11. «Хаотический» массив данных (с директивным периодом 25 лет), показывающий отсутствие зависимости параметров сейсмичности от времени

с квазипериодичностью для всех событий с магнитудой выше 4 (рис. 10, а), с параметрами «хаотической» последовательности показало, что предполагаемая квазипериодичность в природе реально существует.

Последние два квазицикла из полученных нами для полигона 5 – 1970–2005 гг. и 2008–2022 гг. (рис. 12, а) – не являются идеально выраженными с представленных выше позиций: первый из них может быть искажен влиянием Рачинского землетрясения, а второй еще не завершен.

Последовательность событий квазицикла 1970–2005 гг. после Рачинского землетрясения 1991 г. была искажена четырьмя «отскоками» от линии квазипериодичности в виде относительно крупных сейсмических событий (табл. 3, рис. 12). Это связано с тем, что часть ареала афтершоков Рачинского землетрясения 1991 г. попадает в площадь нескольких рассматриваемых полигонов, а эпицентр главного толчка Рачинского землетрясения входит в площадь полигона 8.

На активизацию сейсмического процесса вблизи Пшекиш-Тырныузского разлома после Дагестанского землетрясения 1970 г. ($M = 6.6$), имевшую место даже 20 лет спустя, уже обращали внимание исследователи, например, [Рогожин и др., 2014]. С.С. Арефьевым высказано предположение, что Дагестанское землетрясение было максимально возможным для данной области и вызвало сильную перестройку напряженного состояния горных пород и, соответственно, сейсмического режима территории [Арефьев и др., 2004]. Однако с учетом обнаруженной нами квазицикличности можно предположить, что упомянутая активизация связана с возникновением Рачинского землетрясения, сильнее для Большого Кавказа. Это хорошо видно на рис. 12, а, где последовательность «отскоков» (сильных землетрясений выше графика падения магнитуды со временем) на полигоне 5 появляется позже специально вынесенной отметки главного толчка этого землетрясения, попавшего на полигон 8. Заметим, что активизация захватила

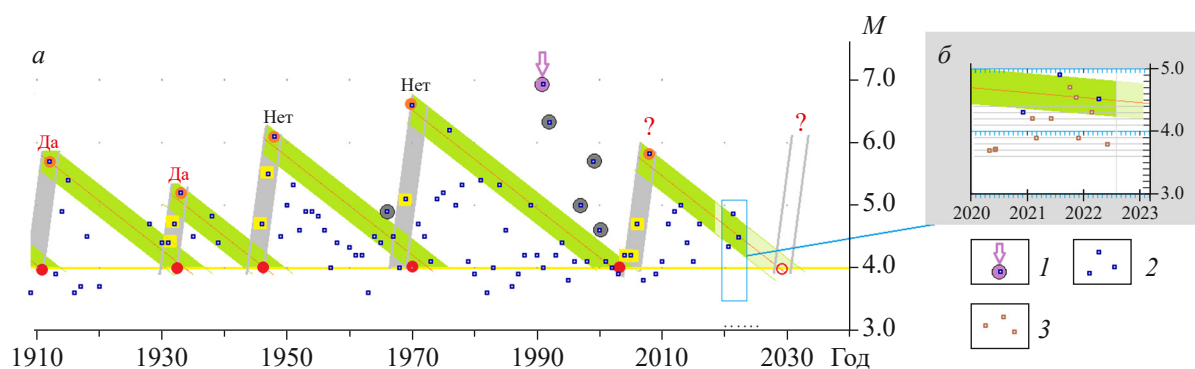


Рис. 12. Квазипериодичность для полигона 5 (а) и текущая сейсмичность (2020–2022 гг.), используемая для анализа возможности среднесрочного прогноза сейсмичности этого полигона (б)

1 – положение главного толчка Рачинского землетрясения, попавшего на полигон 8, показанное для сравнения с положениями четырех «отскоков»; 2 – землетрясения с максимальной за год магнитудой; 3 – остальные землетрясения (меньшей магнитуды) после 2019 г. по табл. 4

Таблица 3. Сейсмические события эпизода 1970–2005 гг. (пиковое 1970 г., $M = 6.6$, и «отскоки»), предположительно связанные с влиянием Рачинского землетрясения (8 на рис. 13)

№	Год	φ, °N	λ, °E	M
1	1970	43.00	47.09	6.6
2	1992	42.58	45.10	6.3
3	1997	42.01	45.32	5.0
4	1999	43.12	46.97	5.7
5	2000	42.24	47.43	4.6

по площади весь блок полигона 5 (рис. 13), включая и очаговую область Дагестанского землетрясения, к которой оказалось приурочено Кизилюртское землетрясение (№ 4 в табл. 3: 31.01.1999 г., $M = 5.7$).

С этих же позиций можно считать, что неискаженный график падения магнитуды землетрясений со временем в квазицикле 1970–2005 гг. достиг фонового уровня $M = 4$ примерно в 2003–2005 гг., а затем, после короткого периода

роста магнитуд землетрясений, произошло Курчалойское землетрясение 2008 г., $M = 5.8$, с которого начался тот квазицикл, который продолжается и сейчас. Таким образом, мы предполагаем, что Рачинское землетрясение нарушило квазицикл 1970–2005 гг., что выразилось в появлении четырех «отскоков».

Описанная нами квазипериодичность сейсмического процесса может быть использована для среднесрочного прогноза землетрясений

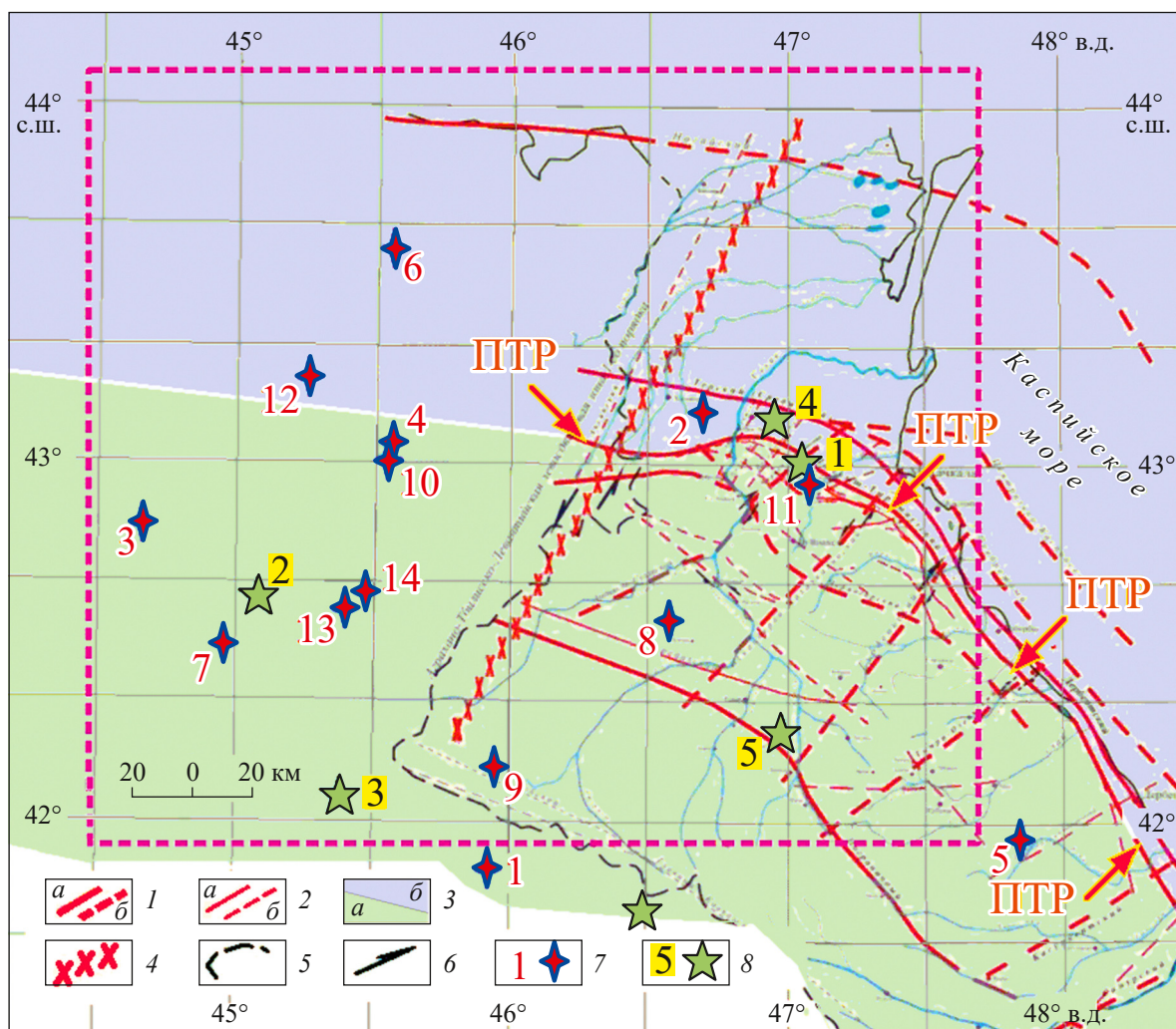


Рис. 13. Расположение эпицентров землетрясений 2020–2022 гг. для полигона 5 (выделен прямоугольником). Для дагестанского сектора полигона дана схема разломно-блокового строения (по [Магомедов, 2017], с изменениями)

1 – границы разломно-блоковых структур и деструктивные зоны первого масштабно-временного уровня – доюрского фундамента (a – достоверные, b – предполагаемые); 2 – границы разломно-блоковых структур и деструктивные зоны второго масштабно-временного уровня – осадочного чехла (a – достоверные, b – предполагаемые); 3 – общее деление региона на Большой Кавказ (a) и Скифскую плиту (b); 4 – Аграхано-Тбилиско-Левантийская левосдвиговая зона первого порядка; 5 – граница Республики Дагестан; 6 – направление движения блоков; 7 – эпицентры землетрясений 2020–2022 гг., не вошедших в каталог максимальных событий, указаны номера по табл. 4; 8 – землетрясения, предположительно связанные с Рачинским землетрясением и выходящие за пределы разрешенного коридора, указаны номера по табл. 3; ПТР – Пшекиш-Тырныаузский разлом

в пределах полигона 5. Общая идея прогноза состоит в том, что для определенного блока мы можем ожидать с достаточно большой вероятностью появления землетрясений с энергией не выше определенного уровня для каждого момента времени. Здесь важно также заметить, что обнаруженные нами циклы представляют собой квазиафтершоковый процесс: сначала блоковая система выводится из равновесия, затем следует короткий период ее активизации (вероятно, накопления энергии),

далее возникает крупное событие, значение магнитуды которого является случайным, поскольку его нельзя определить заранее, и затем в течение длительного времени (10–30 лет), в системе возникают землетрясения, энергия которых уменьшается, и система в конце цикла снова приходит в равновесие. Данная квазипериодичность действительно может быть использована для среднесрочного прогноза, если не принимать во внимание короткие периоды нарастания сейсмичности. На рис. 14

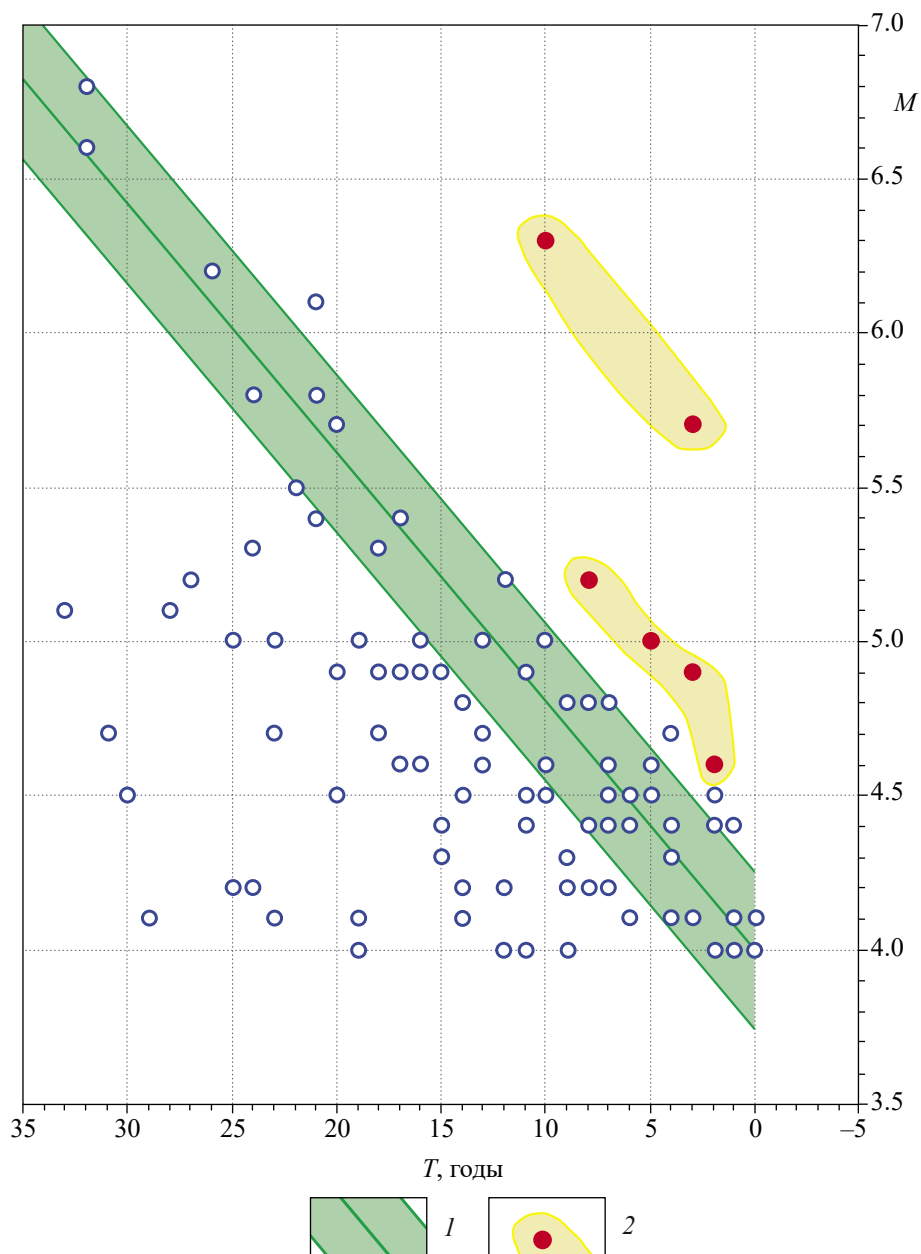


Рис. 14. Кумулятивный график «магнитуда – время до конца квазицикла» для полигона 5, полученный путем суммирования всех эпизодов («положительных» и «негативных»)

1 – теоретический график падения магнитуды со временем и полоса разрешенных отклонений ($0.6M$ в сумме); 2 – «отскоки», нарушающие гипотетическую закономерность (по [Яковлев и др., 2020])

представлен иллюстрирующий эту идею кумулятивный график «магнитуда – время до конца квазицикла», полученный путем суммирования всех эпизодов («позитивных» и «негативных») для полигона 5.

Незавершенный квазицикл 2008–2016/2022 гг. в пределах полигона 5 (см. рис. 12) пока не показывает признаков искажения этого правила. Начавшееся примерно с 2020 г. заметное усиление сейсмичности в восточной части Большого Кавказа (табл. 4, рис. 12, б) остается пока внутри выявленной закономерности: из 14 событий с магнитудой выше 3.7 только одно землетрясение (№ 8 в табл. 4) имеет относительно высокую магнитуду 4.9 и находится на верхней границе разрешенного коридора. Возвращаясь к вопросу о роли Рачинского землетрясения, в этой связи можно еще раз сделать вывод о том, что его искажающее влияние ограничилось циклом 1970–2005 гг.

В настоящий момент в рамках среднесрочного прогноза для полигона 5 нами предполагается дальнейшее ослабление максимальной энергии текущих землетрясений до 2028–2030 гг.; далее, примерно с 2030 по 2035 гг., будет наблюдаться усиление сейсмического процесса и возникновение пикового события с ожидаемой магнитудой от 4.8 до 6.5. Окончательный вывод о возможностях среднесрочного прогноза землетрясений для структур внутри полигона 5 можно будет сделать после 2030 г., когда завер-

шится (придет к фоновому уровню) квазицикл, начавшийся в 2008 г.

Характер выявленной квазипериодичности в части быстрого нарастания энергии происходящих землетрясений до пикового события в начале каждого цикла косвенно указывает на то, что подготовка крупных и катастрофических землетрясений, происходящих крайне редко, с периодичностью в сотни и тысячи лет, может занимать очень малое время – до нескольких лет, а не десятки и сотни лет, как можно было бы ожидать на основе представлений о постепенном накоплении упругой энергии. Вероятно, это может быть связано в первую очередь с возникновением определенных структур в поле тектонических напряжений. Например, в работе [Ребецкий, Маринин, 2006] показано, что Андаманское землетрясение 26.12.2004 г. возникло в условиях появления трех крупных блоков вдоль зоны субдукции (около 300 км в длину каждый) с различными уровнями поля напряжений. Возникшее первоначально в виде смещения по разрыву землетрясение средней силы внутри поля с высоким уровнем напряжений вышло в пределы блока с низким уровнем напряжений и, соответственно, слабым трением, что позволило ему легко разрушить полностью этот второй блок, а затем и третий, сформировав очаг протяженностью около 1000 км. Таким образом, по мнению авторов работы [Ребецкий, Маринин, 2006], это землетрясение приобрело катастрофический характер именно

Таблица 4. Сейсмические события 2020–2022 гг. в пределах полигона 5, показанные на рис. 13

№	Год	Месяц	φ, °N	λ, °E	M
1	2020	4	41.85	45.99	3.7
2	2020	5	43.12	46.66	3.7
3	2020	5	42.78	44.69	3.7
4	2020	12	43.04	45.54	4.3
5	2021	1	42.17	47.96	4.2
6	2021	2	43.54	45.54	3.9
7	2021	5	42.45	44.97	4.2
8	2021	7	42.50	46.56	4.9
9	2021	9	42.15	45.98	4.7
10	2021	10	43.03	45.55	4.5
11	2021	12	42.94	47.06	3.9
12	2022	2	43.20	45.22	4.3
13	2022	3	42.55	45.39	4.5
14	2022	5	42.56	45.47	3.8

по причине существования крупного блока с низким уровнем тектонических напряжений.

В настоящий момент осталась еще не исследованная связь сейсмического процесса внутри оптимального 5-го полигона с тектоническим строением этой части Восточного Кавказа. Однако можно обратить внимание читателя на то, что пиковое событие цикла 1970–2005 гг. – Дагестанское землетрясение 1970 г. – возникло на крупнейшем Пшекиш-Тырныаузском разломе, который является тектонической границей между альпийской структурой Большого Кавказа на юге и эпигерцинской Скифской плитой на севере (см. рис. 13). Эпицентр данного землетрясения приурочен к месту резкой смены простирания разлома с широтного на юго-восточное. Эта конкретная структура представляет собой максимально возможную неоднородность в пределах коры и верхней мантии всего региона – здесь наблюдается контакт двух обширных структур (альпийского Большого Кавказа и постгерцинской Скифской плиты) с разными свойствами крупных массивов (включая, вероятно, и прочность), а также изменение простирания этого контакта. Характерно, что максимальный по магнитуде «отскок» (№ 4 в табл. 3: 1999 г., $M = 5.7$) внутри обсуждаемого квазицикла, который мы считаем искажающим влиянием Рачинского землетрясения, возник в этом же очаге.

Мы полагаем, что Спитакское землетрясение (1988 г., $M = 7.0$) непосредственно не повлияло на циклический характер сейсмичности Восточного Кавказа (Чечни и Дагестана). Этот вывод связан с двумя обстоятельствами. Во-первых, такое влияние можно было бы наблюдать крайне ограниченное время (около 2.5 лет) – до возникновения Рачинского землетрясения, поскольку после 1991 г., если даже такое влияние и было, оно уже маскировалось влиянием более позднего Рачинского события. Во-вторых, на такую оценку влияет тектоническая позиция Спитакского землетрясения – оно возникло внутри дугообразной складчатонадвиговой системы Малого Кавказа, которая отделена от структур Большого Кавказа, включая Восточный Кавказ, стабильным блоком Закавказского срединного массива.

ВЫВОДЫ

1. Подтверждена установленная ранее закономерность развития сейсмичности в пределах дагестанской части Северного Кавказа как квазициклического процесса, наблюдаемого в наиболее чистом виде в пределах блока размером примерно $3^\circ \times 3^\circ$ (полигон 5).

2. Установленная закономерность может быть использована для тестирования теоретических моделей сейсмического процесса.

3. Показана возможность среднесрочного прогноза развития сейсмичности в масштабе десятков лет в рамках полигона 5 по площади для событий, следующих за пиковым землетрясением очередного квазицикла.

4. Установлено, что самое крупное в очередном квазицикле землетрясение, начинающее этот квазицикл, готовится за очень короткое время – 2–3 года. В рамках данного исследования его магнитуда прогнозу не поддается.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках тематики государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01271-23 и FMWU-2022-0011.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Арефьев С.С., Стасюк Е.И., Ривера Л. Модель очага Дагестанского землетрясения 1970 г. // Физика Земли. 2004. № 2. С. 15–27.
- Габсатарова И.П., Борисов П.А. Современный сводный каталог землетрясений Кавказа: проблемы создания и пути совершенствования // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. С. 105–109.
- Габсатарова И.П., Борисов П.А. Сильные землетрясения и афтершоковые последовательности Кавказа / Свидетельство о государственной регистрации в Реестре баз данных № 2018620251 от 12.02.2018.
- Габсатарова И.П., Маловичко А.А., Старовойт О.Е. История инструментальных наблюдений на Северном Кавказе (очерк) // Геофизический журнал. 2008. Т. 30, № 5. С. 50–72.
- Габсатарова И.П., Мехрюшев Д.Ю., Королецки Л.Н., Адилев А.З., Магомедов Х.Д., Саяпина А.А., Багаева С.С., Янков А.Ю., Иванова Л.Е. Северный Кавказ // Землетрясения России в 2018 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2020. С. 17–24.
- Гончаров М.А. Компенсационная, многоярусная и иерархическая геодинамика: сочетание фиксизма и мобилизма // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 1997. Т. 72, вып. 6. С. 13–21.
- Гуфельд И.Л., Корольков А.В., Новоселов О.Н., Хрулёв Е.Н. Отражение геодинамических процессов в локальной геоакустической эмиссии // Вулканонология и сейсмология. 2009. № 6. С. 62–73.
- Етирмишли Г.Д., Абдуллаева Р.Р., Исмаилова С.С., Казымова С.Э. Азербайджан // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 22 (2013 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 56–65.

- Захаров В.С. Анализ характеристик самоподобия сейсмичности и систем активных разломов Евразии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4: Геология. 2011. № 6. С. 10–17.
- Захарова А.И., Старовойт О.Е., Яковлев Ф.Л. Блоковая сейсмичность Северного Кавказа // Дисконтинуальные свойства геофизической среды. М.: Наука, 1989. С. 137–148.
- Комплексная оценка сейсмической опасности территории г. Грозного (Уточнение исходной сейсмичности. Сейсмическое микрорайонирование. Сейсмический риск) / Науч. ред. С.И. Полтавцев. М.: Минстрой России, 1996. 106 с.
- Кондорская Н.В., Федорова И.В. Сейсмические станции «Единой Системы Сейсмических Наблюдений СССР». М.: ОИФЗ РАН, 1996. 36 с.
- Кулинич Р.Г., Валитов М.Г., Прошкина З.Н. Геофизические поля, блоковая структура и сейсмическая активность Центральных Курил // Тихоокеанская геология. 2012. Т. 31, № 6. С. 35–43.
- Лутиков А.И., Габсатарова И.П., Донцова Г.Ю. Об устойчивости параметров сейсмического режима во времени на примере востока центральной части Северного Кавказа // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3, № 3. С. 61–74. <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.04>
- Магомедов Р.А. Геолого-тектонические условия, геодинамическая позиция и современная сейсмичность Восточного Кавказа // Тр. Ин-та геологии Дагестанского научного центра РАН. 2017. № 69-2. С. 12–31.
- Папалашвили В.Г., Чичинадзе В.К. Развитие сейсмологии в Грузии. К 100-летию сейсмологической обсерватории «Тбилиси». Тбилиси: GCI, 1999. 135 с.
- Ребецкий Ю.Л. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений // Проблемы тектонофизики. К 40-летию создания М.В. Гзовским Лаборатории тектонофизики в ИФЗ РАН. М.: ИФЗ РАН, 2008. С. 359–395.
- Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Поле напряжений до Суматра-Андаманского землетрясения 26.12. 2004. Модель метастабильного состояния горных пород // Геология и геофизика. 2006. Т. 47, № 11. С. 1192–1206.
- Ризниченко Ю.В. Об изучении сейсмического режима // Изв. АН СССР. Сер. геофизическая. 1958. № 9. С. 1057–1074.
- Рогожин Е.А. Блоковое строение земной коры Северной Евразии // Физика Земли. 2004. № 10. С. 81–94.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И., Собищев А.Л., Собисевич Л.Е., Горбатилов А.В. Эндогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука, 1987. 100 с.
- Саргсян Г.В., Абгарян Г.Р., Мугнечян Э.А., Геворгян А.А. Армения. // Землетрясения Северной Евразии. Вып. 22 (2013 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. С. 66–74.
- Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М.: ОИФЗ РАН, 1999. 57 с.
- Хаин В.Е., Гончаров М.А. Геодинамические циклы и геодинамические системы разного ранга: их соотношение и эволюция в истории Земли // Геотектоника. 2006. № 5. С. 3–24.
- Яковлев Ф.Л., Стаховская Р.Ю., Габсатарова И.П. О периодичности проявления сейсмичности Дагестана и окрестностей в XIX–XXI веках // Структура, вещественный состав, свойства, современная геодинамика и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов. Воронеж: ВГУ, 2020. С. 405–410.
- Яковлев Ф.Л., Габсатарова И.П., Стаховская Р.Ю. Квазициклическая периодичность сейсмичности восточной части Большого Кавказа за последние 200 лет и среднесрочный прогноз сейсмической активности региона // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: Тезисы докладов Всероссийского совещания, посвященного памяти профессора С.И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. / Отв. ред. К.Ж. Семинский. Иркутск: ИГУ, 2021. С. 232–233.
- Keilis-Borok V.I. The lithosphere of the Earth as a non-linear system with implications for earthquake prediction // Rev. Geophys. 1990. V. 28, Iss. 1. P. 19–34. <https://doi.org/10.1029/RG028i001p00019>
- Tumanova N., Kakhoberashvili S., Omarashvili V., Tserodze M., Akubardia D. National Seismic Network of Georgia // AGU Fall Meeting. San Francisco, December 12–16, 2016. Abstr. ID S11D-2498.

Сведения об авторах

ЯКОВЛЕВ Федор Леонидович – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: yak@ifz.ru

СТАХОВСКАЯ Ритта Юрьевна – Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. E-mail: ritta-st@yandex.ru

ГАБСАТАРОВА Ирина Петровна – Федеральный исследовательский центр «Единая геофизическая служба Российской академии наук». Россия, 249035, Калужская обл., г. Обнинск, пр-т Ленина, д. 189. E-mail: ira@gssras.ru

ON THE REGULAR PERIODICITY OF THE SEISMIC PROCESS IN THE EASTERN CAUCASUS OVER THE PAST TWO CENTURIES

F.L. YAKOVLEV¹, R.YU. STAKHOVSKAYA¹, I.P. GABSATAROVA²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia

Corresponding author: R.Yu. Stakhovskaya, e-mail: ritta-st@yandex.ru

Abstract. More than thirty years ago for the eastern regions of the North Caucasus (Dagestan and Chechnya) on an area of 300×300 km for the period 1800–1985 at a qualitative level the existence of a regular quasi-cyclic regime of seismicity was revealed. The regularity was that the level of seismicity during one cycle lasting 10–30 years decreased from the peak event (magnitude 5.0–6.5) to background values. Then there was a rapid increase in seismicity (2–3 years) until the next peak event. This hypothetical phenomenon was strictly analyzed by us in a formalized way on the data of the extended catalog, including year 2022. The regularity established earlier for the development of seismicity within the specified part of the North Caucasus as a quasi-cyclic process, observed in its purest form within a block of the earth's crust with a size of approximately 3×3 degrees, has been confirmed. This regularity can be used to test the theoretical models of the seismic process. The possibility of a medium-term forecast of the development of seismicity on a time scale of tens of years for a certain block of the Earth's crust is shown. It is shown that the next largest earthquake in the quasi-cycle is prepared in a very short time – 2–3 years.

Keywords: seismicity, North Caucasus, quasi-cyclicality of the seismic process, medium-term seismicity forecasting, Racha earthquake

Financial support

The work was carried out within the State assignment of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences and the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation No. 075-01271-23 and FMWU-2022-0011.

Ethics declarations

The authors declare no conflict of interest.

About the authors:

YAKOVLEV Fedor Leonidovich – Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st. 10-1. E-mail: yak@ifz.ru

STAKHOVSKAYA Ritta Yurievna – Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Russia, 123242, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya st. 10-1. E-mail: ritta-st@yandex.ru

GABSATAROVA Irina Petrovna – Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”. Russia, 249035, Kaluga region, Obninsk, Lenin av. 189. E-mail: ira@gsras.ru

Cite this article as: Yakovlev F.L., Stakhovskaya R.Yu., Gabsatarova I.P. On the regular periodicity of the seismic process in the Eastern Caucasus over the past two centuries, *Voprosy Inzhenernoi Seismologii* (Problems of Engineering Seismology). 2023. V. 50, No. 2. P. 5–24. [in Russian]. <https://doi.org/10.21455/VIS2023.2-1>

English translation of the article will be published in *Seismic Instruments*, ISSN: 0747-9239 (Print) 1934-7871 (Online), <https://link.springer.com/journal/11990>