

ОБ RTL-АНОМАЛИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ В ТУРЦИИ 06.02.2023 г.

© 2023 г. В. Б. Смирнов^{1, 2, *}, А. А. Петрушов^{1, 2}, В. О. Михайлов^{1, 2}

¹Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: vs60@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 24.05.2023 г.

Принята к публикации 13.06.2023 г.

На основе данных регионального каталога землетрясений Турции и сводного каталога ANSS для территории Турции и части Ирана проведен апостериорный анализ RTL-аномалий сейсмического режима перед разрушительным Пазарджыкским землетрясением $M_w 7.8$ 06.02.2023 г. в Турции и для сравнения перед землетрясениями $M_w 7.1$ 23.10.2011 г. (Восточная Турция), $M_w 7.3$ 12.11.2017 г. (Иран), $M_b 7$ 24.01.2020 г. (Восточно-Анатолийский разлом). Перед Пазарджыкским землетрясением уверенно выделяется RTL-аномалия с хорошо выраженными стадиями сейсмического затихья и последующей активизации вблизи эпицентра будущего землетрясения. Пространственный размер этой аномалии в полтора раза меньше размера очага Пазарджыкского землетрясения и в полтора-два раза меньше, чем размеры RTL-аномалий перед другими региональными землетрясениями с магнитудами более 7. Он соответствует размеру аномалии перед землетрясением $M_w 6.7$, произошедшем на том же разломе. В качестве гипотезы о причине несоответствия размера аномалии перед Пазарджыкским землетрясением $M_w 7.8$ размерам, характерным для землетрясений $M7+$, выдвинуто предположение о том, что обнаруженная RTL-аномалия отражает формирование только первого относительно небольшого сегмента очага Пазарджыкского землетрясения.

Ключевые слова: сейсмический режим, сейсмические аномалии, Пазарджыкское землетрясение.

DOI: 10.31857/S0002333723060200, EDN: NFDEPI

ВВЕДЕНИЕ

Пазарджыкское землетрясение (Pazarcik earthquake¹) 06.02.2023 г. с магнитудой $M_w 7.8$ явилось сильнейшим землетрясением в Восточно-Анатолийской зоне разломов (ВАЗР) за период инструментальных наблюдений. Исследования по физике процессов подготовки очагов землетрясений и мировая практика прогностических исследований свидетельствуют, что перед такими землетрясениями уверенно выявляются среднесрочные прогностические аномалии, по крайней мере при апостериорном анализе [Завьялов, 2006; Соболев, 1993; 2011; 2015; Соболев, Пономарев, 2003; Stefansson, 2011; Sobolev, 2011; Panza, 2022]. Целью настоящей работы было апостериорное исследование вопроса о наличии или отсутствии аномалии сейсмического режима перед Пазарджыкским землетрясением.

В качестве параметра сейсмического режима использовался комплексный параметр, впервые введенный в практику сейсмологических исследований в 1996 г. [Соболев и др., 1996] и получивший впоследствии достаточно широкое распространение [Салтыков, Кугаенко, 2000; Huang et al., 2001; 2002; 2004; 2006; 2008; 2019; Huang, Nagano, 2002; Салтыков, Кравченко, 2009; Shashidhar et al., 2010; Кравченко, 2010; Huang, Ding, 2012; Di Giovambattista, Туупкин, 2000; 2004; Nagao et al., 2011; Салтыков и др., 2011; 2018; Gentili et al., 2017; Puangjaktha, Pailoplee, 2018; Proskura et al., 2019; Kali et al., 2021; Zhang, Huang 2022; Смирнов, Петрушов, 2023]. Этот параметр, получивший название RTL, характеризует нормализованную интенсивность процесса сейсмогенерации, отнесенную к каждой точке среды в каждый момент времени. Точки и моменты времени задаются исследователем, сейсмогенерация рассчитывается по данным сейсмического каталога за предшествующие моменты времени. Вклад каждого землетрясения учитывается с весом, увели-

¹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/executive> Здесь и далее ссылки на Интернет-ресурсы актуальны на июнь 2023 г. Русская транскрипция названия Pazarcik – согласно [Словарь ..., 1986].

чивающимся с увеличением размера очага землетрясения и уменьшающимся с увеличением расстояния от гипоцентра землетрясения до точки расчета и времени, прошедшего от момента землетрясения до момента, на который производится расчет. Для изменения RTL во времени известен образ предвестниковой аномалии, включающей в себя две стадии: уменьшение RTL, ассоциируемое с сейсмическим затишьем, и последующее его увеличение, ассоциируемое с форшоковой активизацией [Соболев, 2015; Соболев, Пономарев, 2003]. Аномалии RTL наблюдаются, как правило, в диапазоне на несколько единиц меньших, чем магнитуда основного землетрясения. Характерные длительности RTL-аномалий составляют от нескольких месяцев до нескольких лет, по-видимому, в зависимости от величины землетрясения. Пространственные размеры аномалий RTL обычно превосходят размеры очага основного землетрясения, а его эпицентр часто оказывается на краю аномалии. С физической точки зрения аномалии RTL отражают изменение режима сейсмогенного разрушения в локализованной пространственной области, называемой иногда метастабильной очаговой областью будущего землетрясения. Образ предвестниковой аномалии RTL (затишье с последующей активизацией) связывают с концепцией лавинно-неустойчивого трещинообразования ЛНТ [Соболев, 2019; Смирнов, Пономарев, 2020].

ОБЪЕКТЫ АНАЛИЗА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Кроме главного для этой работы Пазарджыкского землетрясения 2023 г. мы для сравнения изучили вопрос о наличии RTL-аномалий перед двумя землетрясениями $M7+$: в Восточной Турции (M_w 7.1 23.10.2011 г.) и в Иране (M_w 7.3 12.11.2017 г.), связанными, как и Пазарджыкское землетрясение, со взаимодействием Африканской, Аравийской литосферных плит и Анатолийского блока. Также мы рассмотрели предшествующее сильное землетрясение M_w 6.7 24.01.2020 г., произошедшее на сегменте ВАЗР. Северное окончание очага Пазарджыкское землетрясения 2023 г. примыкает к южной части очага этого землетрясения 2020 г. [Михайлов и др., 2023]. Эпицентры землетрясений показаны на рис. 1.

В качестве исходных данных для анализа сейсмического режима перед землетрясениями 2020 и 2023 гг. мы использовали региональный каталог Турции (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute)². В каталоге представлено более 160 тысяч записей о землетрясениях с 1960 г. по

настоящее время в области, ограниченной координатами 26–45 градусов по долготе и 35–42 градусов по широте с магнитудой $M \geq 2.5$. Магнитуды различных землетрясений представлены различными шкалами: ML , Md , MS , mb , M_w . В качестве “единой” для всех землетрясений в каталоге обозначена магнитуда xM , представляющая собой максимальное значение из магнитуд различных шкал для данного землетрясения. Мы оценили отклонение магнитуд различных шкал от xM и обнаружили, что в среднем оно не превосходит 0.2. Исходя из этого мы не стали проводить унификацию магнитудных шкал и приняли, как и авторы каталога, за магнитуду события величину xM .

На рис. 2а представлен график повторяемости землетрясений регионального каталога. Видно, что он имеет прямолинейную форму, что подтверждает допустимость использования величины xM в качестве магнитудной характеристики. На рис. 2б представлены изменения представительной магнитуды во времени, оцененные по авторской методике, основанной на алгоритме Писаренко [Смирнов, 2009; Смирнов, Пономарев, 2020]. Опираясь на оценки представительности, мы выбрали для дальнейшей работы данные за интервал времени 01.01.1990–05.02.2023 г. с селекцией по магнитуде $M \geq 3.5$. Такая селекция обеспечивает однородность каталога по представительной магнитуде и достаточна для отыскания RTL-аномалий перед землетрясениями $M7.8$ и $M6.7$. Афтершоки из рабочего каталога были удалены для главных событий с магнитудой 5 и более. Для удаления афтершоков использовалась процедура Молчана–Дмитриевой [Смирнов, 2009; Смирнов, Пономарев, 2020].

Для анализа сейсмического режима перед землетрясениями 2011 и 2017 гг. мы использовали каталог ANSS Геологической службы США (USGS)³. Иранское землетрясение 2017 г. не попадает в региональный каталог Турции, а землетрясение 2011 г. на востоке Турции попадает на край регионального каталога. Выборка на сайте USGS производилась в координатах 26–49 градусов по долготе и 31–43 градусов по широте для землетрясений с магнитудой $M \geq 2.5$ за интервал времени с 1963 г. по настоящее время. Объем выборки составил более 25 тысяч событий.

На рис. 2а видно, что в диапазоне землетрясений $M \geq 4$ график повторяемости каталога ANSS совпадает с графиком повторяемости региональ-

² <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/earthquake-catalog/>

³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

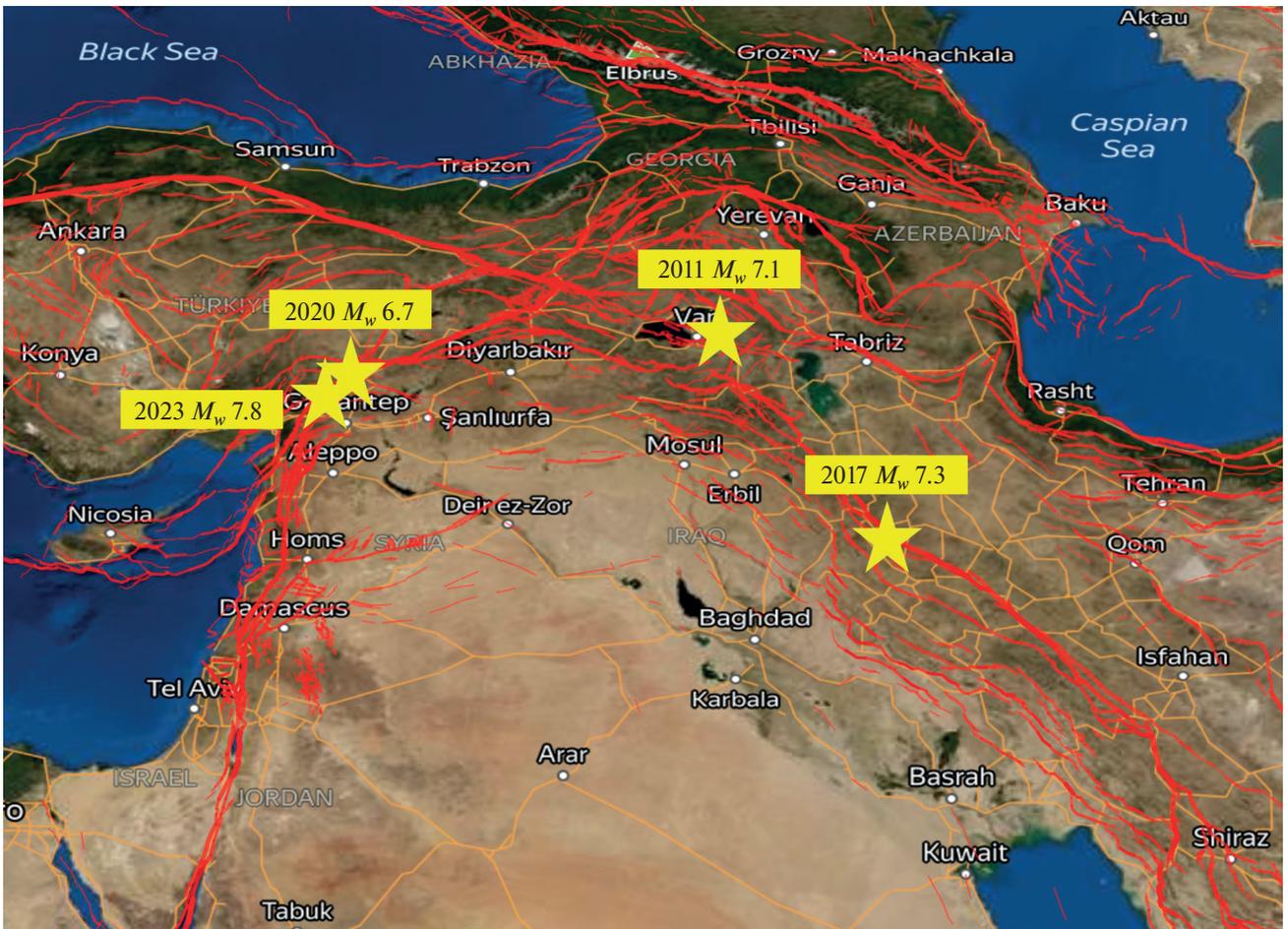


Рис. 1. Эпицентры исследованных землетрясений. Около значков подписаны год и магнитуда землетрясения. Основа – карта активных разломов ГИН РАН (http://neotec.ginras.ru/index/database/database_map.html).

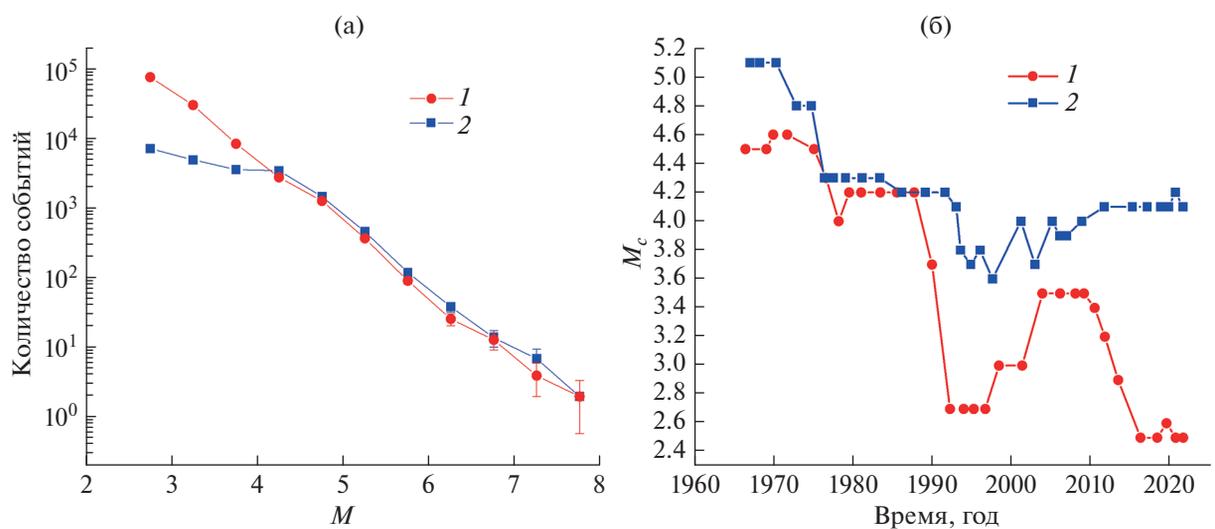


Рис. 2. График повторяемости (а) и изменение представительной магнитуды (б) исходных сейсмических каталогов: 1 – региональный каталог Турции, 2 – каталог ANSS на территории Турции и Ирана.

ного каталога. Излом графика повторяемости на значениях магнитуды около 4 связан, по нашему мнению, не с потерей информации об относительно слабых событиях, а с неоднородностью магнитудной шкалы. В каталоге ANSS, в отличие от регионального каталога Турции, для каждого землетрясения приведено единственное значение магнитуды и отдельно указан тип этой магнитуды. При этом диапазон магнитуд достаточно велик – от 2.5 до 7.8. Такой диапазон магнитуд не удастся, как правило, перекрыть магнитудной шкалой одного типа. Обычно для относительно слабых землетрясений используются магнитуды по длительности или другие локальные магнитуды, а для более сильных землетрясений – магнитуды, опирающиеся на измерения амплитуды тех или иных волн (*mb*, *MS*) или моментные магнитуды *M_w*. Проверка показала, что именно так обстоит дело в случае каталога ANSS. В диапазоне *M* ≤ 4 магнитуды по длительности *M_d* составляют 55%, локальные магнитуды *ML* – 36%, что в совокупности дает 91%. Остальные 9% приходятся на магнитуды *mb*, магнитуд *MS* и *M_w* нет. В диапазоне *M* > 4 ситуация противоположная: магнитуды *mb* составляют 80%, *M_w* – 13%, *MS* – 1%, что дает в совокупности 94%, а на *M_d* и *ML* приходится оставшиеся 6%. Излом графика повторяемости приходится как раз на граничное значение магнитуды *M* ≈ 4, при переходе через которое в каталоге меняется преобладающий тип магнитудной шкалы. Смена шкалы и обуславливает, по нашему мнению, излом графика повторяемости.

Методика оценки представительной магнитуды основана на отыскании величины магнитуды, при которой график повторяемости перестает быть прямолинейным. Естественно, что автоматическое применение такой процедуры в скользящих временных окнах обоснованно определяет излом графика повторяемости как нарушение его линейности. На рис. 2б видно, что значения *M_c* определенной таким образом представительной магнитуды выходят на значения 4.1–4.2, соответствующие излому графика повторяемости, около 1985 г. Большие значения *M_c* в более ранние годы отражают реальное изменение (уменьшение со временем) представительной магнитуды. Исходя из этого, мы приняли для селекции рабочего каталога ANSS для территории Турции и Ирана значение магнитуды 3.5 – такое же, как для регионального каталога Турции, в интервале времени 01.01.1985–05.02.2023 гг. Афтершоки из рабочего каталога ANSS, также как и для регионального

каталога, были удалены для главных событий с магнитудой 5 и более.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Описание алгоритма расчета параметра RTL приведено в литературе [Соболев и др., 1996; Соболев, Пономарев, 2003]. Детали реализации алгоритма описаны в работе [Смирнов, Петрушов, 2023]. Алгоритм имеет несколько параметров, смысл которых следует из базовых определений RTL:

$$RTL = R \cdot T \cdot L, \quad (1)$$

$$R(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{r_i}{r_0}\right) - R_s, \quad (2)$$

$$T(x, y, z, t) = \sum_i \exp\left(-\frac{t_i}{t_0}\right) - T_s, \quad (3)$$

$$L(x, y, z, t) = \sum_i \left(\frac{l_i}{l_0}\right)^p - L_s. \quad (4)$$

Здесь: *r_i* – расстояние от *i*-го землетрясения до точки (*x, y, z*), в которой производится расчет; *t_i* – интервал времени от момента *i*-го землетрясения до заданного для расчета времени *t*; *l_i* – размер очага *i*-го землетрясения. Величины *p*, *r₀* и *t₀* являются существенными параметрами алгоритма. Для ускорения работы алгоритма вводится ограничение области расчета радиусом *R₀*, обычно в 2–3 раза превосходящим значение *r₀*, и аналогичное ограничение интервала времени величиной *T₀*. Эти параметры также следует контролировать при сопоставлении результатов расчета RTL. В табл. 1 приведена сводка параметров алгоритма, использованных при расчете карт RTL по заданной пространственной сетке и с заданным шагом по времени, для четырех рассмотренных землетрясений. Значение параметра *p* было фиксированным и равным 1, что обеспечивает устойчивость оценки сейсмического энерговыделения

Таблица 1. Параметры алгоритма RTL для выделения аномалий

Землетрясение (год, магнитуда)	<i>r₀</i> , км	<i>R₀</i> , км	<i>t₀</i> , сут	<i>T₀</i> , сут
2011 г., <i>M_w</i> 7.1	70	170	365	720
2017 г., <i>M_w</i> 7.3	70	170	365	720
2020 г., <i>M_w</i> 6.7	70	170	90	180
2023 г., <i>M_w</i> 7.8, вариант 1	70	170	365	720
2023 г., <i>M_w</i> 7.8, вариант 2	70	170	90	180

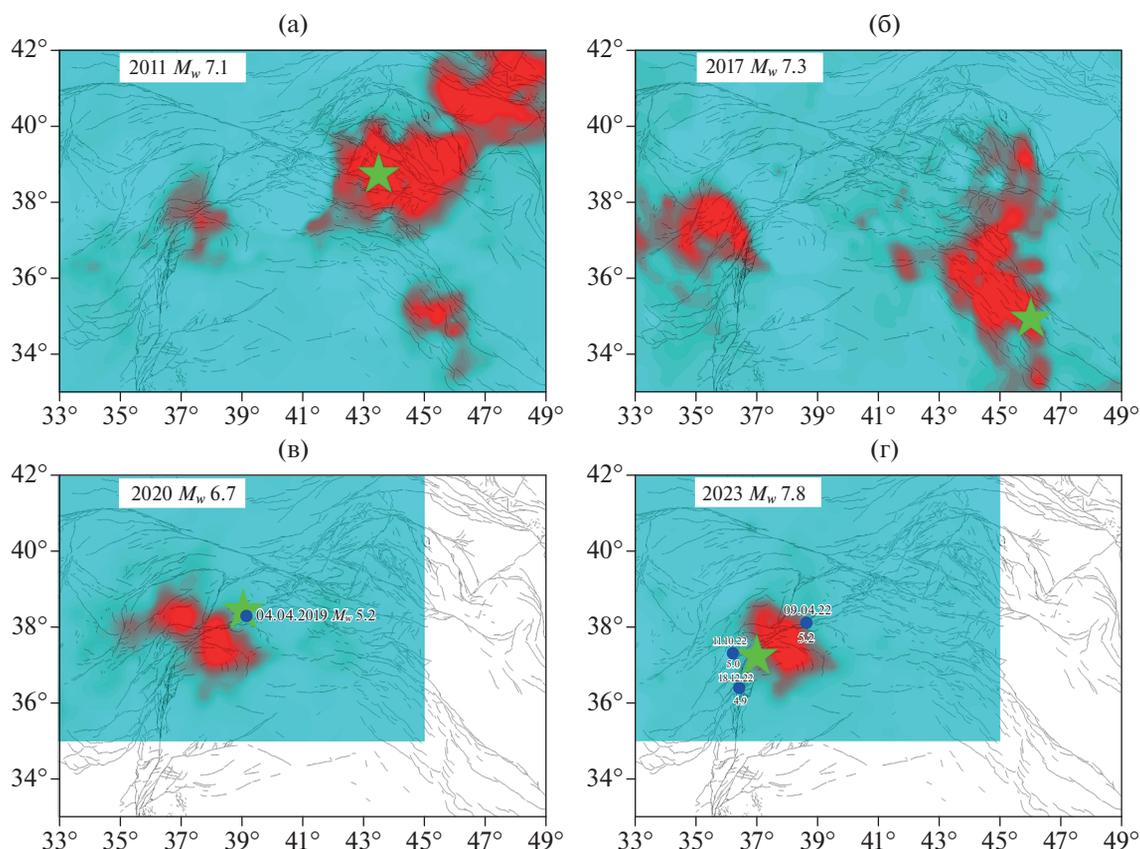


Рис. 3. Карты RTL (кригинг-интерполяция на сетке с шагом 0.16 градуса, линейная аппроксимация вариограммы в области радиусом 2 градуса). Год и магнитуда землетрясения подписаны сверху карт. Красный цвет соответствует отрицательным значениям RTL. Зелеными звездами показаны эпицентры землетрясений. Черные линии – система активных разломов по базе данных ГИН РАН (<http://neotec.ginras.ru/database.html>) [Zelenin et al., 2022] (показаны все разломы вне зависимости от их атрибутов). На рис. (в) и (г) точками показаны более слабые землетрясения (около них подписаны даты и магнитуды), произошедшие в окрестности очагов основных изучаемых землетрясений (пояснения в тексте).

(более подробно см. в работе [Смирнов, Петрушов, 2023]). Шаг пространственной сетки составлял 30 км, шаг по времени – 10 сут.

На рис. 3 представлены карты параметра RTL для выбранных землетрясений. Карты относятся к моментам времени с наибольшими по величине и пространственным размерам аномалиями. На рис. 4 представлены графики изменения параметра RTL во времени в точках, расположенных в центрах аномалий, приведенных на рис. 3.

Результаты, относящиеся к Пазарджыкскому землетрясению M_w 7.8, представлены на рис. 3г и рис. 4г. При расчете RTL со стандартными параметрами (вариант 1 в табл. 1) на рис. 4г (кривые 1 и 2) видно, что землетрясение произошло с некоторой задержкой после завершения цикла затишья – активизация (уменьшение-увеличение RTL). Достаточно детальные данные регионального каталога позволили выявить форшоковую

активизацию. При расчете RTL с меньшим временным окном (вариант 2 в табл. 1, кривые 3 и 4 на рис. 4) видно увеличение RTL в область положительных значений на временах, соответствующих трем землетрясениям с магнитудами в диапазоне 4.9–5.2, произошедшим вблизи гипоцентра и в пределах очаговой области Пазарджыкского землетрясения в течение 10 месяцев перед ним (эпицентры этих землетрясений показаны на рис. 3г, их времена указаны в подписи к рис. 4).

Перед землетрясением M_w 6.7 24.01.2020 г. (рис. 3в и 4в) данные регионального каталога также позволили выявить увеличение RTL, обусловленное предшествующим землетрясением меньшей магнитуды M_w 5.2 04.04.2019 г. На рис. 4в виден пик, отвечающий активизации сейсмичности при этом землетрясении.

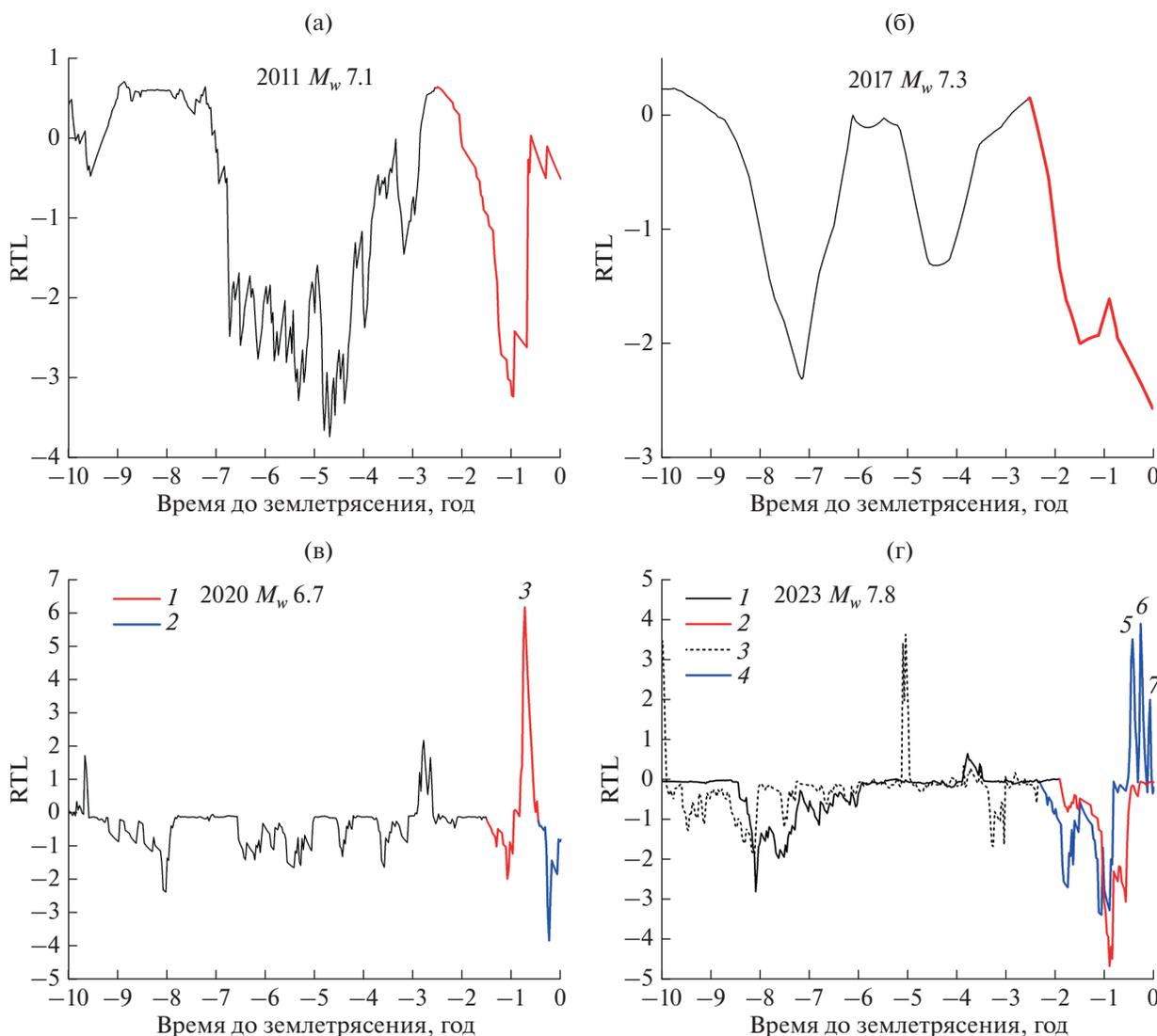


Рис. 4. Графики изменения RTL во времени в центрах аномалий, показанных на рис. 3. Годы и магнитуды землетрясений подписаны на рисунках. На рисунках (а) и (б) красным цветом выделены аномалии RTL перед землетрясениями. На рисунке (в): 1 и 2 – два варианта выделения аномалии, 3 – пик, соответствующий времени землетрясения M_w 5.2 04.04.2019 г., произошедшего вблизи очага основного землетрясения. На рисунке (г): 1 и 2 – RTL и аномалия при расчете по варианту 1 (см. табл. 1), 3 и 4 – по варианту 2; 5, 6, 7 – пики, соответствующие временам землетрясений M_w 5.2 09.04.2022 г., M_w 5.0 11.10.2022 г., M_w 4.9 18.12.2022 г., произошедших вблизи очага основного землетрясения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Апостериорно перед Пазарджыкским землетрясением уверенно выделяется аномалия RTL, отвечающая известному бухтообразному образу предвестника: затишье (уменьшение RTL) с последующей активизацией (увеличение RTL) – рис. 3г и рис. 4г. Стадия активизации завершилась выраженными форшоками, уверенно выделяемыми по пикам кривой RTL (кривая 4 на рис. 4г). По расположению в пространстве аномалия RTL покрывает северную часть очага Пазарджыкского землетрясения (см. ниже).

Для сопоставления параметров RTL-аномалии перед Пазарджыкским землетрясением с аномалиями перед другими землетрясениями $M7+$, произошедшими в схожих тектонических условиях, и соседним землетрясением M_w 6.7, произошедшем на том же разломе, мы свели в табл. 2 оценки пространственных размеров и длительностей аномалий RTL, обнаруженных перед всеми этими землетрясениями. Оценки размеров и длительностей производились визуально по картам и графикам, приведенным на рис. 3 и рис. 4. В качестве размеров аномалий принимались максимальные размеры пятен (рис. 3) вблизи эпи-

центров соответствующих землетрясений. Напомним, что представленные на рис. 3 карты соответствуют моментам времени максимальной аномалии RTL. В качестве длительности аномалии принималось время от начала уменьшения величины RTL до момента землетрясения (эти интервалы показаны на рис. 4 цветом).

Для землетрясения 2020 г. нельзя однозначно оценить длительность аномалии RTL, поскольку не ясно, началась ли аномалия до землетрясения M_w 5.2 04.04.2019 г. (кривая 1 на рис. 4в, длительность аномалии 1.5 года) или после него (кривая 2 на рис. 4в, длительность аномалии 0.5 года). В таблице приведены оба значения. Разброс оценочного размера аномалии определяется размером одного или обоих пятен на рис. 3в.

Из табл. 2 следует, что размер аномалии перед Пазарджыкским землетрясением 2023 г. значительно меньше, чем перед землетрясениями $M7+$ 2011 и 2017 гг. при том, что магнитуда Пазарджыкского землетрясения заметно больше магнитуд землетрясений 2011 и 2017 гг. Размер аномалии перед Пазарджыкским землетрясением соизмерим с размером аномалии перед более слабым землетрясением 2020 г. с магнитудой M_w 6.7.

Представления о физике процессов подготовки землетрясений связывают размер RTL-аномалии (как и размеры других аномалий, относящихся к физическим предвестникам) с размером метастабильной зоны, который определяет размер будущего землетрясения [Сидорин, 1992; Соболев, 2011; Sobolev, 2011]. При этом, как правило, размер RTL-аномалии бывает больше размера очага будущего землетрясения. Для Пазарджыкского землетрясения это не так: размер RTL-аномалии 170 км меньше размера очага землетрясения, составляющего суммарно почти 300 км, и не соответствует размерам аналогичных землетрясений $M7+$. Для прояснения возможной причины такого несоответствия обратимся к рассмотрению структуры очага Пазарджыкского землетрясения.

Согласно данным Геологической службы США, Пазарджыкское землетрясение имеет сложную трехсегментную структуру очага и трехэтапную историю его вспарывания (рис. 5). Землетрясение началось со вспарывания в течение первых 10–15 с относительно небольшого сегмента длиной около 40 км. Этот сегмент примыкает под углом к двум основным сегментам Восточно-Анатолийского разлома длиной примерно по 130 км каждый. Их вспарывание началось на 15–20 с после того, как волна вспарывания

Таблица 2. Размеры и длительности аномалий RTL

Землетрясение (год, магнитуда)	Размер аномалии, км	Длительность аномалии, год
2011 г., M_w 7.1	390	2.5
2017 г., M_w 7.3	270	2.5
2020 г., M_w 6.7	150–210	1.5 или 0.5
2023 г., M_w 7.8	170	1.9–2.3

первого небольшого сегмента дошла до этих больших сегментов.

Высказываются предположения, что сегменты Восточно-Анатолийского разлома, составившие основной очаг Пазарджыкского землетрясения, находились в критическом напряженном состоянии, и разрушение первого маленького сегмента (рис. 5б) явилось триггером большого 260-километрового очага (рис. 5в, 5г) [Смирнов и др., 2023⁴; Тихоцкий и др., 2023; Ребецкий, 2023]. Если принять это предположение, то с точки зрения процесса подготовки очага землетрясения можно говорить о подготовке землетрясения с очагом около 40 км, отвечающим первому сегменту очага Пазарджыкского землетрясения. Оценить магнитуду такого землетрясения можно по данным о скорости \dot{M}_0 нарастания сейсмического момента в процессе вспарывания очага. Интегрируя \dot{M}_0 по времени, получим нарастание сейсмического момента в процессе вспарывания, а переходя от сейсмического момента к магнитуде — нарастание магнитуды. Соответствующий результат приведен на рис. 6.

На рис. 6 видно, что если бы вспарывание очага ограничилось только первым сегментом, то такое землетрясение имело бы магнитуду M_w 6.7. Землетрясению именно такой магнитуды соответствует размер обнаруженной нами RTL-аномалии сейсмического режима. RTL-аномалии отражают развитие трещиноватости, приводящее к образованию в литосфере метастабильной зоны, которая затем разрушается разрывом основного очага. При этом RTL не контролирует непосредственно величину поля напряжений и их близость к критическим значениям. Если верно, что основные сегменты Восточно-Анатолийского разлома, составившие основной очаг землетрясения M_w 7.8 06.02.2023 г., находились в критиче-

⁴ https://phys.msu.ru/rus/news/archive_news/detail.php?ID=33909

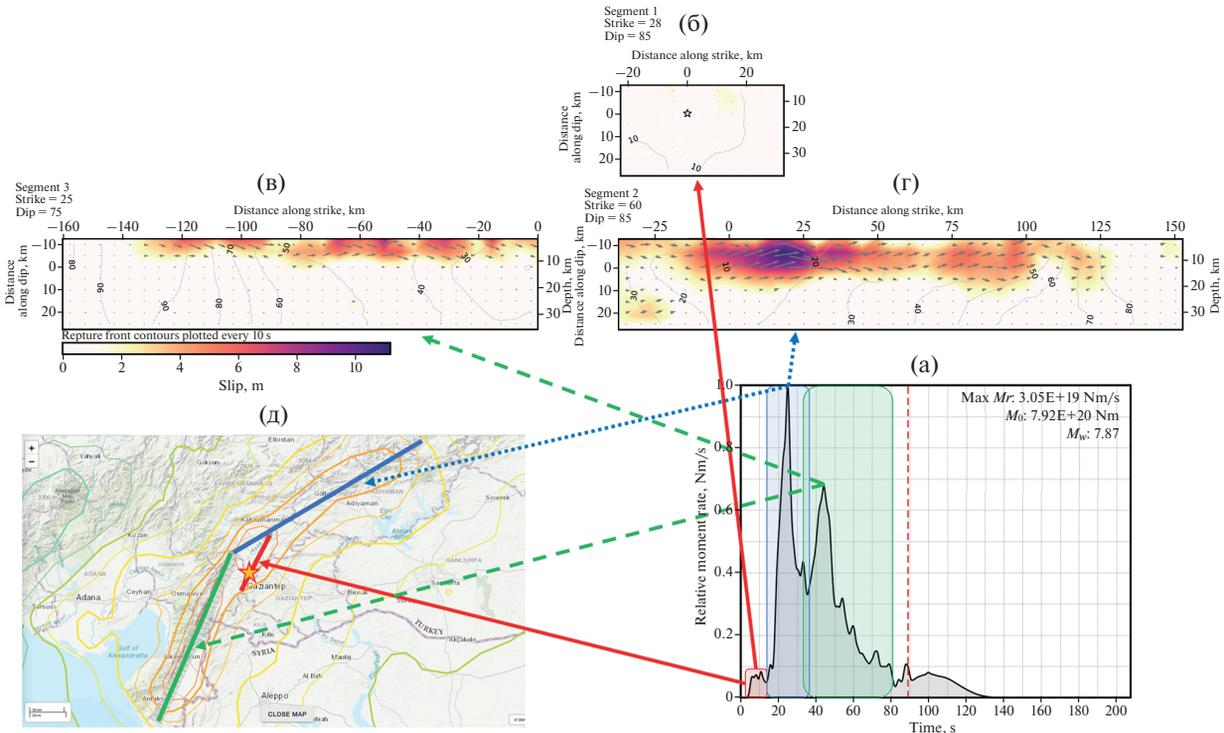


Рис. 5. Трехсегментный очаг Пазарджыкского землетрясения (по данным Геологической службы США <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000jllz/executive>): (а) – нормированная скорость нарастания сейсмического момента во времени; затенением показаны последовательные стадии, относящиеся к вспарыванию трех сегментов очага. Стрелками показаны модели плоскостей вспарывания: (б), (в), (г) – первый, второй, третий сегмент, соответственно; цвет на плоскостях – величина подвижки, изолинии – время прохождения фронта вспарывания в секундах; (д) – карта с нанесенными сегментами, звезда – инструментальный эпицентр землетрясения.

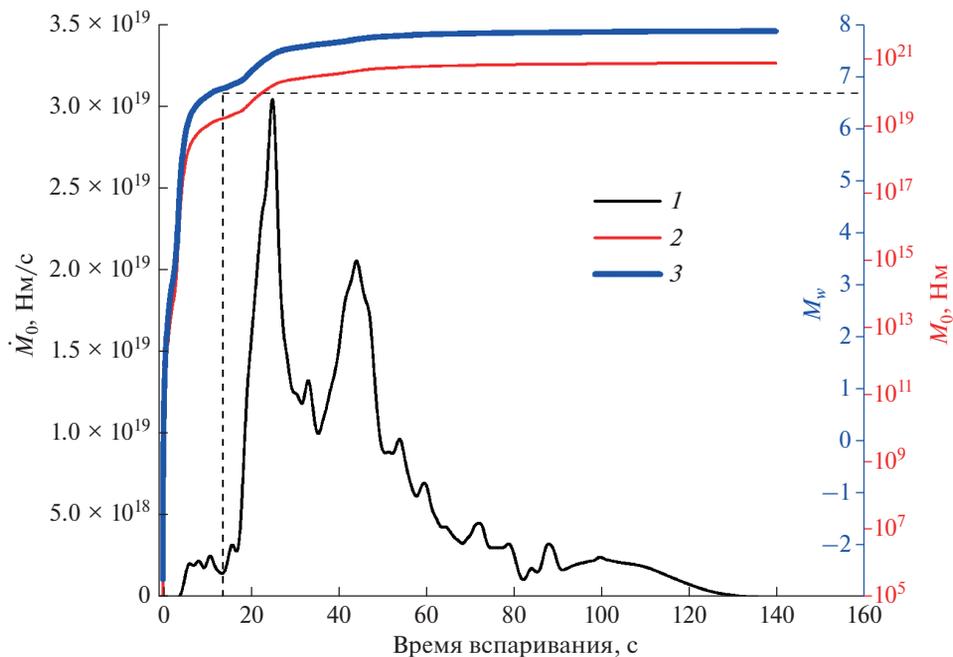


Рис. 6. Нарастание магнитуды при вспарывании очага Пазарджыкского землетрясения: 1 – скорость \dot{M}_0 нарастания сейсмического момента (по данным USGS); 2 – нарастание сейсмического момента к моменту времени t : $M(t) = \int_0^t \dot{M}_0(\tau) d\tau$; 3 – нарастание магнитуды $M_w(t) = \frac{2}{3}(\lg M_0(t) - 9.05)$. Пунктирные линии показывают окончание вспарывания первого сегмента очага и соответствующую ему магнитуду M_w 6.7.

ском напряженном состоянии, а разрушение первого маленького сегмента спровоцировало вспарывание большого 260-километрового очага, то выявленная нами небольшая RTL-аномалия сейсмического режима, вероятно, отразила подготовку только этого “зародышевого” очага размером около 40 км с магнитудой M_w 6.7.

В заключение отметим, что предложенная нами гипотеза о природе относительно небольшой аномалии RTL перед землетрясением M_w 7.8 06.02.2023 г. демонстрирует опасность построения алгоритмов прогноза землетрясений только по сейсмическим данным (тем более, по какому-то одному параметру сейсмичности). При стандартном анализе, выполняемом для прогноза землетрясений с магнитудой $M_w > 7.5$, выявленная нами апостериорно небольшая (для таких землетрясений) аномалия RTL, вероятнее всего, не была бы замечена, а алгоритм прогноза допустил бы ошибку “пропуск цели”. Для прогноза землетрясений, имеющих сложный очаг и нестандартную динамику его вспарывания (подобных Пазарджыкскому землетрясению), необходимы геофизические данные, отражающие не только аномалии развития разрушения, но и аномалии напряженно-деформированного состояния, например, информация о размере и локализации областей аномальных деформаций в разломной зоне.

ВЫВОДЫ

1. Апостериорный анализ позволил уверенно выделить аномалию RTL перед Пазарджыкским землетрясением M_w 7.8 06.02.2023 г. Вид аномалии соответствует “образу” RTL-предвестника: хорошо выражены стадии затишья и последующей активизации сейсмичности вблизи эпицентра будущего землетрясения. При детальном рассмотрении видно проявление форшоков.

2. Пространственный размер RTL-аномалии перед Пазарджыкским землетрясением M_w 7.8 в полтора раза меньше размера очага землетрясения и в полтора-два раза меньше размера аномалий перед другими региональными землетрясениями с магнитудами более 7. Он соответствует размеру аномалии перед землетрясением M_w 6.7, произошедшем на том же разломе.

3. В качестве гипотезы о причине несоответствия размера аномалии перед Пазарджыкским землетрясением M_w 7.8 размерам, характерным для землетрясений $M7+$, выдвинуто предположение о том, что обнаруженная RTL-аномалия отражает формирование только первого относи-

тельно небольшого сегмента очага Пазарджыкского землетрясения. Размер этого сегмента и накопленный при его вспарывании сейсмический момент отвечают землетрясению с магнитудой M_w 6.7. С такой магнитудой согласуется размер обнаруженной RTL-аномалии.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 23-27-00067 “Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед сильными землетрясениями”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука. 2006. 254 с.

Кравченко Н.М. Сопоставление сейсмических затиший, обнаруженных методами RTL- и Z-тест. Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Второй региональной научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 11–17 октября 2009 г. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН 2010. С. 211–215.

Михайлов В.О., Бабаянц И.П., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Тихоцкий С.А. Реконструкция косейсмических и постсейсмических процессов для землетрясения в Турции 06.02.2023 по данным радарной спутниковой интерферометрии // Физика Земли. 2023. № 6. С. 77–88.

Ребецкий Ю.Л. Тектонофизическое районирование сейсмогенных разломов восточной Анатолии и Караманмарашские землетрясения 06.02.2023 г. // Физика Земли. 2023. № 6. С. 37–65.

Салтыков В.А., Кравченко Н.М. Комплексный анализ сейсмичности Камчатки 2005–2007 гг. на основе регионального каталога // Вулканология и сейсмология. 2009. №4. С. 53–63.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 57–65.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Воронаев П.В. Пространственно-временные особенности сейсмической подготовки и афтершокового процесса Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. M_w 7.8. Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXI региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога. 2018. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2018. С. 137–140.

Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А., Кравченко Н.М., Коновалова А.А. Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. №1. С. 65–84.

Сидорин А. Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука. 1992. 191 с.

- Словарь географических названий зарубежных стран. 3-е изд. / Аненберг Л.И. и др. (отв. сост.). Комков А.М. (ред.). М.: Недра. 1986. 459 с.
- Смирнов В. Б. Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 7–22.
- Смирнов В.Б., Петрушов А.А. Стадийность проявления аномалий сейсмического режима перед землетрясениями Камчатки, Японии и Исландии // Физика Земли. 2023. № 5. С. 62–78.
- Смирнов В.Б., Петрушов А.А., Михайлов В.О. Аномалии сейсмического режима перед землетрясениями в Восточной Турции. Ломоносовские чтения МГУ 4–12 апреля 2023 г. Секция физики. Тезисы. М.: Физический факультет МГУ. 2023. С. 207–209.
- Смирнов В.Б., Пономарев А.В. Физика переходных режимов сейсмичности. М.: РАН. 2020. 412 с.
- Соболев Г.А. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М.: ИФЗ РАН. 2011. 56 с.
- Соболев Г.А. Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования – ЛНТ // Физика Земли. 2019. № 1. С. 166–179.
- Соболев Г.А. Физические основы прогноза землетрясений. М.: Наука. 1993. 314 с.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
- Соболев Г.А., Тюпкин Ю.С., Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. Способ среднесрочного прогноза землетрясений // Докл. РАН. 1996. Т. 347. № 3. С. 405–407.
- Соболев Г.А. Методология, результаты и проблемы прогноза землетрясений // Вестник РАН. 2015. Т. 85. № 3. С. 203–208.
- Тихоцкий С.А., Татевосян Р.Э., Ребецкий Ю.Л., Овсяченко А.Н., Ларьков А.С. Караманмарашские землетрясения 2023 г. в Турции: сейсмическое движение по сопряженным разломам // Докл. РАН. 2023. Т. 511. № 2. С. 228–235.
- Di Giovambattista R., Tyupkin Yu. S. Seismicity patterns before the $M = 5.8$ 2002, Palermo (Italy) earthquake: seismic quiescence and accelerating seismicity // Tectonophysics. 2004. V. 384. P. 243–255.
- Di Giovambattista R., Tyupkin Y.S. Spatial and temporal distribution of seismicity before the Umbria–Marche September 26, 1997 earthquakes // J. Seismology. 2000. V. 4. P. 589–598.
- Gentili S., Di Giovambattista R., Peresan A. Seismic quiescence preceding the 2016 central Italy earthquakes // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2017. V. 272. P. 27–33.
- Huang Q. Search for reliable precursors: A case study of the seismic quiescence of the 2000 western Tottori prefecture earthquake // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. P. B04301. <https://doi.org/10.1029/2005JB003982>
- Huang Q. Seismicity changes prior to the Ms8.0 Wenchuan earthquake in Sichuan, China // Geophysical Research Letters. 2008. V. 35. P. L23308. <https://doi.org/10.1029/2008GL036270>
- Huang Q. Seismicity pattern changes prior to large earthquakes—An approach of the RTL algorithm // Terrestrial atmospheric and oceanic sciences. 2004. V. 15. P. 469–492.
- Huang Q. Seismicity Pattern Changes Prior to the 2008 Ms7.3 Yutian Earthquake // Entropy. 2019. V. 21(2). P. 118. <https://doi.org/10.3390/e21020118>
- Huang Q., Ding X. Spatiotemporal variations of seismic quiescence prior to the 2011 M 9.0 Tohoku earthquake revealed by an improved Region–Time–Length algorithm // BSSA. 2012. V. 102. P. 1878–1883.
- Huang Q., Nagao T. Seismic quiescence before the 2000 $M = 7.3$ Tottori earthquake // Geophysical research letters. 2002. V. 29. № 12. P. 1578. <https://doi.org/10.1029/2001GL013835>
- Huang Q., Öncel A.O., Sobolev G.A. Precursory seismicity changes associated with the $M_w = 7.4$ 1999 August 17 Izmit (Turkey) earthquake // Geophys. J. Int. 2002. V. 151. P. 235–242.
- Huang Q., Sobolev G.A., Nagao T. Characteristics of the seismic quiescence and activation patterns before the $M = 7.2$ Kobe earthquake, January 17, 1995 // Tectonophysics. 2001. V. 337. P. 99–116.
- Kali R., Zaytsev A., Burnaev E. Recurrent Convolutional Neural Networks help to predict location of Earthquakes // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters PP. 2021. V. 99. P. 1–5.
- Nagao T., Takeuchi A., Nakamura K. A new algorithm for the detection of seismic quiescence: Introduction of the RTM algorithm, a modified RTL algorithm // Earth Planets and Space. 2011. V. 63. P. 315–324. <https://doi.org/10.5047/eps.2010.12.007>
- Panza G.F., Kossobokov V.G., Laor E., De Vivo B. Earthquakes and sustainable infrastructure. Elsevier. 2022. 648 p.
- Proskura P., Zaytsev A., Braslavsky I., Egorov E., Burnaev E. Usage of Multiple RTL Features for Earthquakes Prediction. Computational Science and Its Applications – ICCSA 2019. ICCSA 2019. Lecture Notes in Computer Science. V. 11619. Springer. Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-24289-3_41
- Puangjaktha P., Pailoplee S. Application of the region–time–length algorithm to study of earthquake precursors in the Thailand–Laos–Myanmar borders // J. Earth System Science. 2018. V. 127. P. 1–12.
- Shashidhar D., Kumar N., Mallika K., Gupta H. Characteristics of seismicity patterns prior to the $M \sim 5$ earthquakes in the Koyna Region, Western India - application of the RTL algorithm // Episodes. 2010. V. 33(2). P. 83–89.
- Sobolev G.A. Seismicity dynamics and earthquake predictability // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 1–14.
- Stefansson R. Advances in earthquake prediction. Springer. 2011. 245 p.
- Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4489–4503.
- Zhang Y., Huang Q. Seismicity Changes before Major Earthquakes in Sichuan, China, Revealed by a Combination of the RTL Algorithm and ETAS Model // Seismological Research Letters. 2022 V. 94 (2A). P. 844–851. <https://doi.org/10.1785/0220220282>

The RTL Anomaly of Seismicity before the February 6, 2023 Earthquake in Turkey

V. B. Smirnov^{a, b, *}, A. A. Petrushov^{a, b} and , and V. O. Mikhailov^{a, b}

^aFaculty of Physics, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^bSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123995 Russia

*e-mail: vs60@mail.ru

Abstract—Based on the data from the regional Turkey earthquake catalog and the ANSS Comprehensive Earthquake Catalog for Turkey and a part of Iran, a posteriori analysis of RTL anomalies of seismicity before the damaging M_w 7.8 Pazarcik earthquake in Turkey of February 6, 2023 and, for comparison, before the M_w 7.1 earthquake of October 23, 2011 (Eastern Turkey), the M_w 7.3 earthquake of November 12, 2017 (Iran), and the M 6.7 earthquake of January 24, 2020 (the East Anatolian Fault), was made. Distinctly observable before the Pazarcik earthquake is an RTL anomaly with well-marked stages of a seismic quiescence and subsequent activation near the epicentre of the future earthquake. Spatially, the anomaly is one-and-a-half times smaller than the source of the Pazarcik earthquake, and one-and-a-half - two times smaller than RTL anomalies before other regional earthquakes with a magnitude above 7. By size, it corresponds to the anomaly before the M_w 6.7 earthquake that occurred on the same fault. As a hypothesis to explain why the size of the anomaly before the M_w 7.8 Pazarcik earthquake does not match the sizes of the anomalies characteristic of $M7+$ earthquakes, it was assumed that the detected RTL anomaly reflects the formation only of the first, relatively small segment of the source of the Pazarcik earthquake.

Keywords: seismic regime, seismic anomalies, Pazarcik earthquake