



SEISMICITY AND CRUSTAL SEISMOTECTONIC DEFORMATIONS OF THE ANATOLIAN PLATE (TURKEY)

N.A. Sycheva  

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10-1 Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow 123242, Russia

ABSTRACT. The paper deals with the study of seismicity and the crustal stress-strain state of Turkey whose tectonics is caused by relative movements of the African, Aegean, Arabian, Anatolian, Black Sea and Eurasian plates. Seismotectonic deformations (STD) were calculated using the approaches proposed by Yu.V. Riznichenko and S.L. Yunga. The distribution of seismicity, average annual STD rate (STD intensity), seismogenic rupture concentration parameter and the Tsallis parameter was plotted from the earthquake catalog data analysis (more than 300000 events for 1900–2022). The representative part includes the events with $M \geq 2.5$. The distribution of the above-mentioned parameters was calculated for a 0–40 km layer wherein most of the earthquakes are located. Deep-focus earthquakes occur at a depth to 170 km. The maximum annual number of earthquakes (more than 90) was recorded in Balikesir Province. Seismicity and STD intensity analysis was made on the periods of 1997–2009 and 2010–2022 for the western and eastern parts of Turkey and for the destructive February 6, 2023 earthquake area. The number of earthquakes recorded in the western part of Turkey (75 %) largely exceeds that recorded in the eastern part (25 %). In the period 2010–2022, there was an increase in the number of earthquakes in the eastern part of Turkey relative to the period 1997–2009, which made up 38 % of the total number of earthquakes. The studies of STD direction are based on the earthquake focal mechanism data (807 events for 1976–2023). STD intensity in the February 6, 2023 earthquake area, with regard to the February 6, 2023 earthquakes, is $1.34 \cdot 10^{-6} \text{ year}^{-1}$, and the background intensity for the entire period of observation (1900–2022) is $-10^{-10} \text{ year}^{-1}$. The STD maps show the diversity of deformation settings in the study area. Turkey is largely dominated by the horizontal shear mode (eastern and central parts). The extension mode manifests itself in the southwestern part. The western part of Turkey and the southern part of the East Anatolian fault zone are characterized by transtension mode. The Lake Van area is characterized by transpression mode. The shortening axis direction changes from sublatitudinal in the west of Turkey to submeridional in the east. STD tensors served as a base for plotting the distributions of the Lode – Nadai coefficient μ_ε and the vertical component. Based on the seismic and GNSS data, a comparison was made between the shortening and elongation axes directions.

KEYWORDS: earthquake; focal mechanism; shortening and elongation axes; STD modes; STD intensity; Lode – Nadai coefficient; Turkey; the Anatolian plate

FUNDING: The work was performed as part of the state assignment of the Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences.



EDN: YJRTTA

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Nailia A. Sycheva, ivtran@mail.ru

Received: February 14, 2023

Revised: May 10, 2023

Accepted: May 12, 2023

FOR CITATION: Sycheva N.A., 2024. Seismicity and Crustal Seismotectonic Deformations of the Anatolian Plate (Turkey). *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (1), 0743. doi:10.5800/GT-2024-15-1-0743

English version: see article page online

СЕЙСМИЧНОСТЬ И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ АНАТОЛИЙСКОЙ ПЛИТЫ (ТУРЦИЯ)

Н.А. Сычева

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 123242, Москва, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе исследована сейсмичность и напряженно-деформированное состояние земной коры Турции, тектоника которой обусловлена относительными движениями Африканской, Эгейской, Аравийской, Анатолийской, Черноморской и Евразийской плит. Расчет сейсмо тектонических деформаций (СТД) выполнен на основе подходов, предложенных в работах Ю.В. Ризниченко и С.Л. Юнги. Построение графиков распределения сейсмичности, среднегодовой скорости СТД (интенсивность СТД), параметра концентрации сейсмогенных разрывов и параметра Тсаллиса выполнено на основе анализа данных каталога землетрясений (более 300000 событий, 1900–2022 гг.). Представительная часть включает в себя события с $M \geq 2.5$. Распределение указанных параметров рассчитано для слоя 0–40 км, где локализована основная часть землетрясений. Глубокофокусные землетрясения происходят до глубины 170 км. Максимальное число землетрясений в год зарегистрировано в провинции Баликесир (более 90). Анализ сейсмичности и интенсивности СТД выполнен по двум временным периодам – 1997–2009 гг. и 2010–2022 гг. для западной и восточной части Турции, а также области разрушительных землетрясений 6 февраля 2023 г. Количество землетрясений, регистрируемых в западной части (75 %) Турции, значительно превышает количество землетрясений в восточной (25 %). В период 2010–2022 гг. увеличилось количество землетрясений в восточной части Турции по отношению к периоду 1997–2009 гг. и составило 38 % от общего числа событий. Исследования направленности СТД основаны на данных о фокальных механизмах очагов (807 событий, 1976–2023 гг.). Интенсивность СТД в области землетрясений 6 февраля 2023 г. с учетом этих землетрясений составляет $1.34 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹, а фоновая интенсивность за весь период наблюдений (1900–2022 гг.) имеет порядок 10^{-10} год⁻¹. По картам СТД отмечено разнообразие деформационных обстановок на территории исследования. На территории Турции преобладает режим горизонтального сдвига (восточная и центральная часть). Режим растяжения проявляется в юго-западной части. Для западной части Турции и южной части ВАРЗ (Восточная Анатолийская зона разломов) характерен режим трансенсии. Область расположения оз. Ван характеризуется режимом транспрессии. Направление осей укорочения меняется от субширотного на западе Турции до субмеридионального на востоке. На основе тензоров СТД построены графики распределения коэффициента Лоде – Надаи μ_e , вертикальной компоненты. Проведено сравнение направлений осей укорочения и удлинения на основе сейсмических данных и данных Глобальной навигационной спутниковой системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: землетрясение; фокальный механизм; оси удлинения и укорочения деформации; режимы СТД; интенсивность СТД; Лоде – Надаи; Турция; Анатолийская плита

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Работа проведена в рамках государственного задания ИФЗ РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Турция – страна, известная своей уникальной географией, соединяющая континенты и культуры. Она также объединяет несколько тектонических плит, включая Евразийскую, Африканскую и Аравийскую через Анатолийскую плиту [Bommer et al., 2002], которая находится на ее территории. В результате взаимодействия Анатолийской плиты со всеми окружающими плитами образуется активный сейсмический регион, который охватывает большую часть Турции.

Кинематика Анатолии (рис. 1, а) и ближайшего окружения представляет интерес для многих исследователей из-за разнообразия ее тектонического строения, связанного с твердотельным вращением, коллизией и субдукцией континентальной плиты, крупными сдвиговыми и надвиговыми разломами, сжатием и растяжением [Barka, Kadinsky-Cade, 1988; Sengör et al., 1985].

Анатолия ограничена Северо-Анатолийской зоной разломов (САРЗ) на севере, Восточно-Анатолийской зоной разломов (ВАРЗ) на востоке, а также Греческой и Кипрской дугами на юге, где сходятся Аравийская, Африканская и Евразийская плиты. ВАРЗ очерчивает границу между Аравийской и Анатолийской плитами и представляет собой зону разломов протяженностью 600 км в юго-восточном простирании между Карлиовой (район провинции Бингөл в Турции) на севере и Кахраманмараш (провинция и город в Турции) на юге [Arpat, Saraglu, 1972; Westaway, 1994; McKenzie, 1972]. Ее часто считают продолжением системы разломов на севере Мертвого моря, где субдукция Африканской плиты под Анатолию и дифференциальное движение Аравийской плиты по отношению к Африканской плите являются главными приводящими механизмами. Вместе с САРЗ система ВАРЗ является одной из самых активных систем трансформных разломов в Турции.

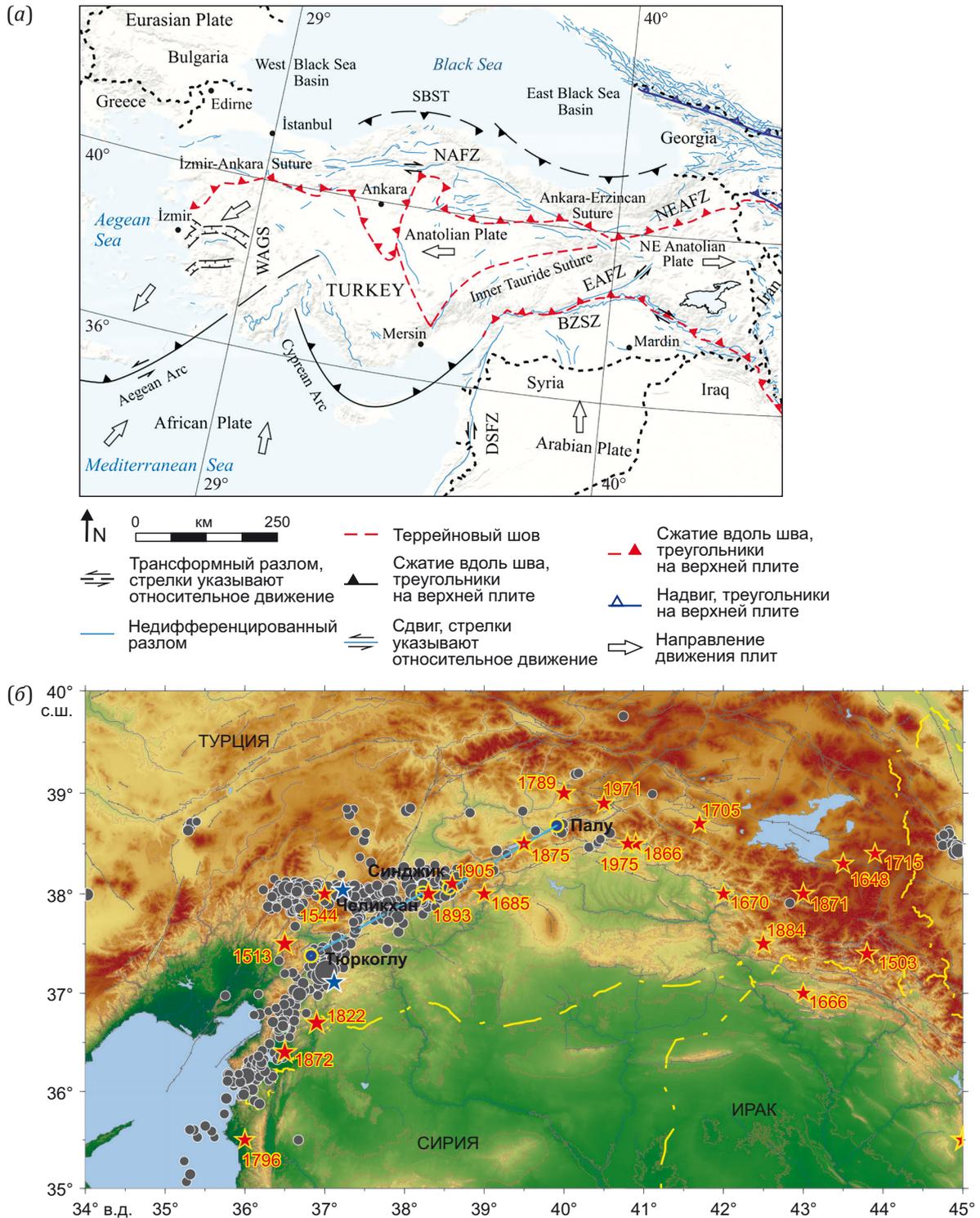


Рис. 1. Взаимодействие плит на территории Турции и окружающих территориях (а) [Işik et al., 2021] и карта землетрясений (более 500 событий), произошедших в Турции в 2023 г. (б).

Звездочки – эпицентры землетрясений: красные – исторические [Ambraseys, 1989], синие – землетрясения, произошедшие 6 февраля 2023 г. с $M_w=7.8$ и $M_w=7.5$. Голубые линии – сейсмические бреши на ВАРЗ из [Aktug et al., 2016]: сегмент Палу-Синджик и сегмент Челихан-Тюркоглу (города Турции). Серые линии – локальные и региональные разломы по [Bachmanov et al., 2017]. Штрихпунктирные линии – государственные границы.

Fig. 1. Interaction of plates on the territory of Turkey and in its environment (а) [Işik et al., 2021] and map of earthquakes (more than 500 events) that occurred in Turkey in 2023 (б).

Asterisks stand for the epicenters of historical earthquakes (red) [Ambraseys, 1989] and the February 6, 2023 earthquakes with $M_w=7.8$ and $M_w=7.5$ (blue). Blue lines are seismic gaps on the EAFZ (East Anatolian Fault Zone) [Aktug et al., 2016]: Palu-Sincik and Çelikhan-Türkoğlu segments (named after the cities of Turkey). Gray lines are local and regional faults [Bachmanov et al., 2017]. Dash-dotted lines are state borders.

Неотектонику Турции определяют три основных элемента [Bozkurt, 2001]:

– Эгейско-Кипрская дуга, сходящаяся граница плит, где Африканская плита на севере погружается под Анатолийскую плиту на юге;

– зона Северо-Анатолийского разлома (САРЗ);

– зона Восточно-Анатолийского разлома (ВАРЗ).

Кроме того, важную роль играет центральная зона разлома Мертвого моря.

ВАРЗ является второй крупной системой разломов в Турции после САРЗ. В отличие от САРЗ, в которой произошло 11 крупных землетрясений за последние ~75 лет, ВАРЗ была относительно спокойной в течение того же периода времени, хотя исторические записи показывают, что ВАРЗ может вызывать сильные землетрясения [Ambraseys, 1989]. Скорости смещения разломов по ВАРЗ не были подробно изучены и не получили достаточной количественной оценки при определении сейсмического риска [Gunes, 2015]. Возможно, это связано с относительно низкой сейсмичностью и медленными скоростями проскальзывания ВАРЗ по отношению к САРЗ [Aktug et al., 2016].

В зонах разломов САРЗ и ВАРЗ уже в инструментальный период Турция пережила несколько сильных землетрясений ($M > 7.0$). Наиболее значительным среди них было землетрясение в Коджаэли (провинция Турции с центром в г. Измит) (17.08.1999 г., $M_w = 7.4$), а самым последним перед событиями 2023 г. – землетрясение в Ване (23.10.2011 г., $M_w = 7.2$) [Erdik et al., 2012].

Наиболее заметными землетрясениями ВАРЗ являются Бингёль (город в Турции) (22.05.1971 г., $M_w = 6.6$) и Сюрю (разлом в провинции Малатья, Турция) (05.05.1986 г., $M_w = 6.1$). Данные о крупных исторических доинструментальных землетрясениях, которые произошли с 1503 по 1975 г. вдоль ВАРЗ, приведены в работе [Ambraseys, 1989]. Среди них землетрясения 1874 г. ($M = 7.1$) и 1875 г. ($M = 6.7$) у оз. Хазар, а также землетрясение 1513 г. ($M = 7.4$) возле Гельбаши (рис. 1, б).

ВАРЗ представляет собой преимущественно сдвиговую систему разломов с хорошо наблюдаемыми бассейнами растяжения, включая бассейны озер Гельбаши и Хазар [Bozkurt, 2001]. Существуют разные точки зрения на вопрос – когда началось поднятие Восточно-Анатолийского плато. В работах [Dewey et al., 1986; Sengör, Kidd, 1979] указывается, что оно началось около 13 млн лет назад, сразу после столкновения Аравийской и Анатолийской плит. В работе [Robertson, 2000] выдвинуто предположение, что коллизия началась еще в раннем миоцене (16–23 млн лет назад). Время столкновения колеблется от 65 млн лет [Berberian, King, 1981] до 40 млн лет [Hempton, 1987], от 16–23 млн лет [Robertson, 2000] до 5 млн лет [Philip et al., 1989]. По сейсмическим данным утолщение земной коры в результате коллизии достигает ~45 км [Sandvol et al., 2003; Zor et al., 2003], также наблюдается утончение земной коры примерно с 44 км на севере до 36 км на юге. Средняя мощность земной коры вдоль ВАРЗ была оценена в работе [Gök et al., 2007] в 36 км.

Время начала сдвига ВАРЗ все еще обсуждается и колеблется между 1.8 и 12 млн лет назад [Arpat, Saraglu, 1972; Hempton, 1987; Lybérís et al., 1992; Yürür, Chorowicz, 1998]. Сравнение скорости геологического смещения со скоростью GPS, выполненное в работе [Reilinger et al., 1997], позволило предположить, что начало сдвига относится к эпохе плиоцена (4–5 млн лет назад). Оценки возраста отдельных сегментов разломов колеблются от 3–5 млн лет до позднего эоцена [Jaffey, Robertson, 2001; Westaway, Arger, 2001; Allen et al., 2004].

Во многих работах также обсуждается сегментация ВАРЗ [Barka, Kadinsky-Cade, 1988; Saroglu et al., 1992; Hempton et al., 1981; и др.]. В последних классификациях геометрии сегментов ВАРЗ делится на 11 сегментов [Herece, 2008] и на 7 сегментов [Duman, Emre, 2013]. Семисегментная геометрия [Duman, Emre, 2013] кажется наиболее полной и усовершенствованной моделью на сегодняшний день.

Различается не только геологическое время столкновения Аравийской и Анатолийской плит, но также оценка общего геологического смещения по ВАРЗ: 15–22 км [Hempton, 1985], 22–27 км [Arpat, Saraglu, 1972], 22 км [Dewey et al., 1986] и 27–33 км [Allen et al., 2004]. Геологические данные предполагают скорость смещения 6–10 мм/год, исходя из смещения 35–40 км [Westaway, Arger, 1996]. Бассейн оз. Хазар часто используется для оценки общего смещения. Общее геологическое смещение по бассейну оз. Хазар оценивается в пределах от 9 до 27 км [Arpat, Saraglu, 1972].

Сложная геологическая обстановка и относительно низкая сейсмичность не позволяют точно определить историю затишья или интервалы повторения землетрясений в ВАРЗ. Оценки скорости проскальзывания, основанные по суммам кумулятивных сейсмических моментов, колеблются от 29 до 70 мм/год [Jackson, McKenzie, 1984, 1988; Taymaz, et al., 1991].

В работе [Aktug et al., 2016] были определены скорости смещения разломов на ВАРЗ с помощью геодезических наблюдений с высоким пространственным разрешением. Было отмечено, что скорость левого бокового скольжения ВАРЗ существенно различается между северной и южной частью Тюркоглу (рис. 1, б). Если на севере скорость скольжения почти постоянна (~10 мм/год), то на юге она резко уменьшается до 4.5 мм/год. По сейсмическим данным наблюдается две хорошо известные сейсмические бреши на ВАРЗ [Aktug et al., 2016]: сегмент Палу-Синджик и сегмент Чэлихан-Тюркоглу (отмечены голубыми линиями на рис. 1, б). Определение вариаций скорости подвижки вдоль этих сегментов ВАРЗ имеет решающее значение для оценки сейсмического потенциала. В работе [Aktug et al., 2016] установлено, что наибольшая скорость левостороннего скольжения составила 10.5 ± 0.6 мм/год на участке Палу-Синчик. Поскольку последнее землетрясение на этом сегменте произошло в 1875 г., дефицит скольжения составляет 1.5 м и потенциально может вызвать землетрясение магнитудой 7.4, если весь сегмент разорвется одним событием. Второй сейсмический разрыв

находится на участке между Чэлихан-Тюркоглу, который показывает скорость бокового смещения влево 10.3 ± 0.7 мм/год. Последнее землетрясение на этом отрезке произошло в 1513 г. (рис. 1, б), оно имело дефицит подвижки 5.2 м. В статье [Aktug et al., 2016] отмечено, что даже если предположить, что землетрясение 1893 г. ($M=7.1$) произошло в пределах сегмента Чэлихан-Гольбаши, то этот участок все равно имеет очень высокий сейсмический потенциал для события с $M_w=7.7$. По сути, в работе [Aktug et al., 2016] был сделан прогноз места землетрясения и его силы.

6 февраля 2023 г. в 01:17 в области причленения Левантской зоны активных левых сдвигов (Трансформы Мертвого моря – DST) к Восточно-Анатолийской зоне активных левых сдвигов (район Шехиткамил в Газиантепе) произошло Восточно-Анатолийское землетрясение с $M_w=7.8$, сильнейшее за последние 73 года не только в Турции, но и во всем Средиземноморье, на Ближнем и Среднем Востоке. В тот же день в 10:25 несколько севернее, в зоне активного разлома Чердак (в районе города Экинёзю, провинция Кахраманмараш), произошло землетрясение с $M_w=7.5$ [USGS..., 2023]. По данным [Global CMT Catalog, 2023] магнитуда этого события составила $M_w=7.7$. Эпицентры землетрясений отмечены синими звездочками на рис. 1, б [USGS..., 2023]. После землетрясений было зарегистрировано несколько тысяч повторных толчков с магнитудой самого сильного до $M_w=6.7$ [USGS..., 2023], по данным [Global CMT Catalog, 2023] – $M_w=6.8$ (рис. 1, б). Землетрясения, произошедшие 6 февраля 2023 г., вызвали новый научный интерес к этому региону.

Целью данной работы является анализ сейсмичности и оценка напряженно-деформированного состояния на основе применения метода СТД. Представлены результаты анализа сейсмического процесса в разные периоды времени, а также построены различные карты параметров СТД и проведено сравнение с ГНСС.

2. МЕТОДИКА

Для оценки напряженно-деформированного состояния исследуемой территории применялся метод СТД [Lukk, Yunga, 1979; Riznichenko, 1985; Yunga, 1990; и др.], который активно используется и в настоящее время [Lukk, Shevchenko, 2019; Lukk et al., 2015; и др.]. В работе также рассматривается параметр концентрации сейсмогенных разрывов $K_{ср}$, представленный в работах [Sobolev, Zavyalov, 1980; Zavyalov, 2006].

В основе концепции неэкстенсивной статистической физики лежит понятие энтропии Тсаллиса S_q [Tsallis, 1988], являющейся обобщением энтропии Больцмана-Гиббса и часто используемой для описания сложных динамических систем, которые демонстрируют эффекты памяти, масштабную инвариантность, фрактальность и дальнедействующие корреляции. Неэкстенсивная статистическая физика активно применяется в различных областях знаний, ее применение в сейсмологии описано в работах [Sotolongo-Costa, Posadas, 2004; Telesca, Chen, 2010; Vallianatos et al., 2014; Chelidze

et al., 2018; и др.]. Параметр Тсаллиса q , по мнению многих авторов, можно использовать как меру стабильности активной тектонической зоны [Telesca, Chen, 2010; Vallianatos et al., 2014; Chelidze et al., 2018; и др.]. Резкое увеличение параметра q указывает на усиление взаимодействия между разломными блоками и их фрагментами и связано с отклонением их от равновесного состояния [Chelidze et al., 2018].

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Каталог землетрясений. Для оценки количественного распределения сейсмических событий, параметра Тсаллиса q , параметра сейсмогенных разрывов $K_{ср}$, интенсивности СТД был использован каталог землетрясений (более 300000) Регионального центра мониторинга землетрясений и цунами Обсерватории Кандилли и Института исследования землетрясений Университета Богазичи, Турция [B.U. KOERI-RTMC..., 2023]. Эпицентры землетрясений серыми точками показаны на рис. 2, I. На карту (и ниже на все карты) вынесены локальные и региональные разломы, полученные из Базы данных [Bachmanov et al., 2017]. Сейсмические события группируются вдоль разломных зон. На рис. 2, II, показаны эпицентры сильных землетрясений: темно-красными звездочками отмечены исторические события, которые произошли до 1900 г., красными – сильные землетрясения с 1900 г. по настоящее время, розовыми – землетрясения из [Ambraseys, 1989] и синими – землетрясения, произошедшие 6 февраля 2023 г. с $M_w=7.8$ и 7.5 [USGS..., 2023] (здесь и на рисунках ниже). Справа на рис. 2, II, представлен список землетрясений, произошедших на территории Турции до 1900 г. (24 события, отмечены звездочками темно-красного цвета), с указанием номера события, даты и магнитуды.

На рис. 2, I, справа представлены некоторые статистические характеристики каталога землетрясений: основную часть составляют слабые события с $1.5 \leq M \leq 3$, которые произошли с 1900 по 2022 г. На рис. 2, Iб, показана гистограмма распределения землетрясений по годам начиная с 1970 г. До этого периода каталог включает несколько событий в год. Землетрясения в основном происходят на глубине 0–40 км (рис. 2, Iв). В некоторых областях глубина событий достигает 170 км. На рис. 3 представлены интегральные проекции землетрясений на вертикальную плоскость, которые позволяют увидеть более детальное распределение событий по глубине. Выполнены два разреза: в направлении запад – восток и север – юг. На карте красным цветом отмечены эпицентры землетрясений, которые происходили на глубине 50–170 км. Такие землетрясения локализованы в основном в западной части Турции (провинция Измир, ниже провинций Мигла и Анталия, в Средиземном море). На вертикальных проекциях наблюдается кучность землетрясений на глубине 10 и 30–33 км. Это может быть обусловлено трудностями при определении глубины землетрясений и привязкой их к глубине 10 км или связанной с границей Мохо (30–33 км).

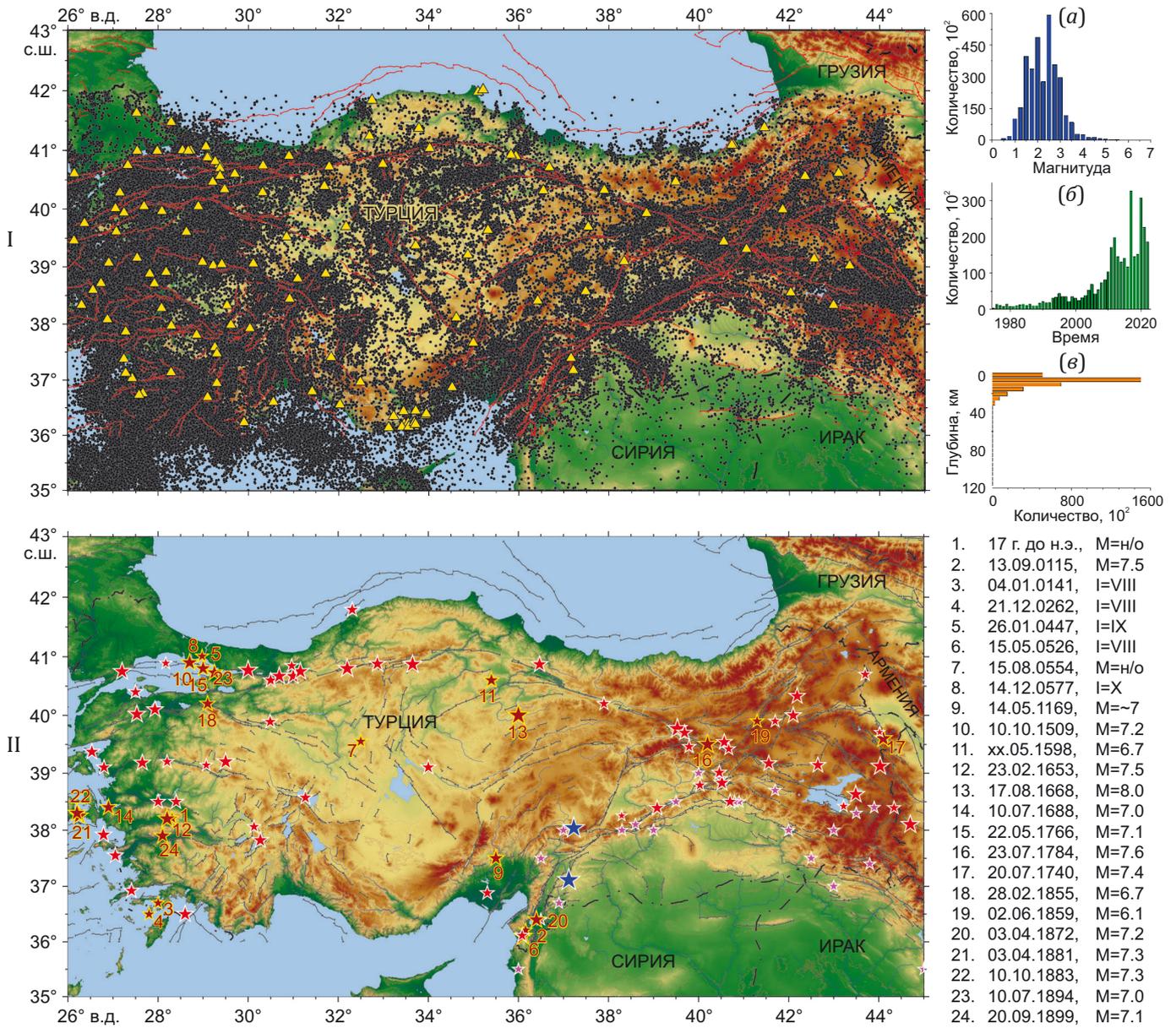


Рис. 2. Эпицентры землетрясений (I) из каталога [B.U. KOERI-RTMC..., 2023] и эпицентры сильных землетрясений (II). См. пояснения в тексте. Справа показаны некоторые количественные распределения: (а) – по магнитуде, (б) – по годам, (е) – по глубине.

Fig. 2. Earthquake epicenters (I) from the catalog [B.U. KOERI-RTMC..., 2023] and epicenters of strong earthquakes (II). See explanations in the text. On the right are some quantitative distributions: (a) – by magnitude, (б) – by years, (e) – by depth.

На рис. 4 представлен график повторяемости землетрясений (рис. 4, а) и кумулятивные распределения Гутенберга – Рихтера (рис. 4, б). По кумулятивному распределению было получено уравнение линейной части (отмечено зеленой линией на графике, аппроксимация выполнена полиномами по методу наименьших квадратов). Уравнение регрессии представлено на фрагменте (б). Согласно полученным результатам, представительными в каталоге являются землетрясения с $M \geq 2.5$.

Для расчета сеймотектонических деформаций использовался каталог фокальных механизмов (КФМ), собранный из трех источников: данные каталога СМТ

[Global CMT Catalog, 2023], GEOFON (<https://geofon.gfz-potsdam.de/>) и KOERI [B.U. KOERI-RTMC..., 2023]. Первый источник включает в себя тензоры сейсмического момента для 554 землетрясений (1976–2023 гг.), второй и третий – параметры нодальных плоскостей 334 (2011–2023 гг.) и 327 (2015–2023 гг.) землетрясений соответственно.

При формировании итогового каталога за основу были выбраны землетрясения из каталога СМТ [Global CMT Catalog, 2023]. Каждый последующий источник сравнивался с первым, и из второго источника перед добавлением к первому исключались дублирующие события.

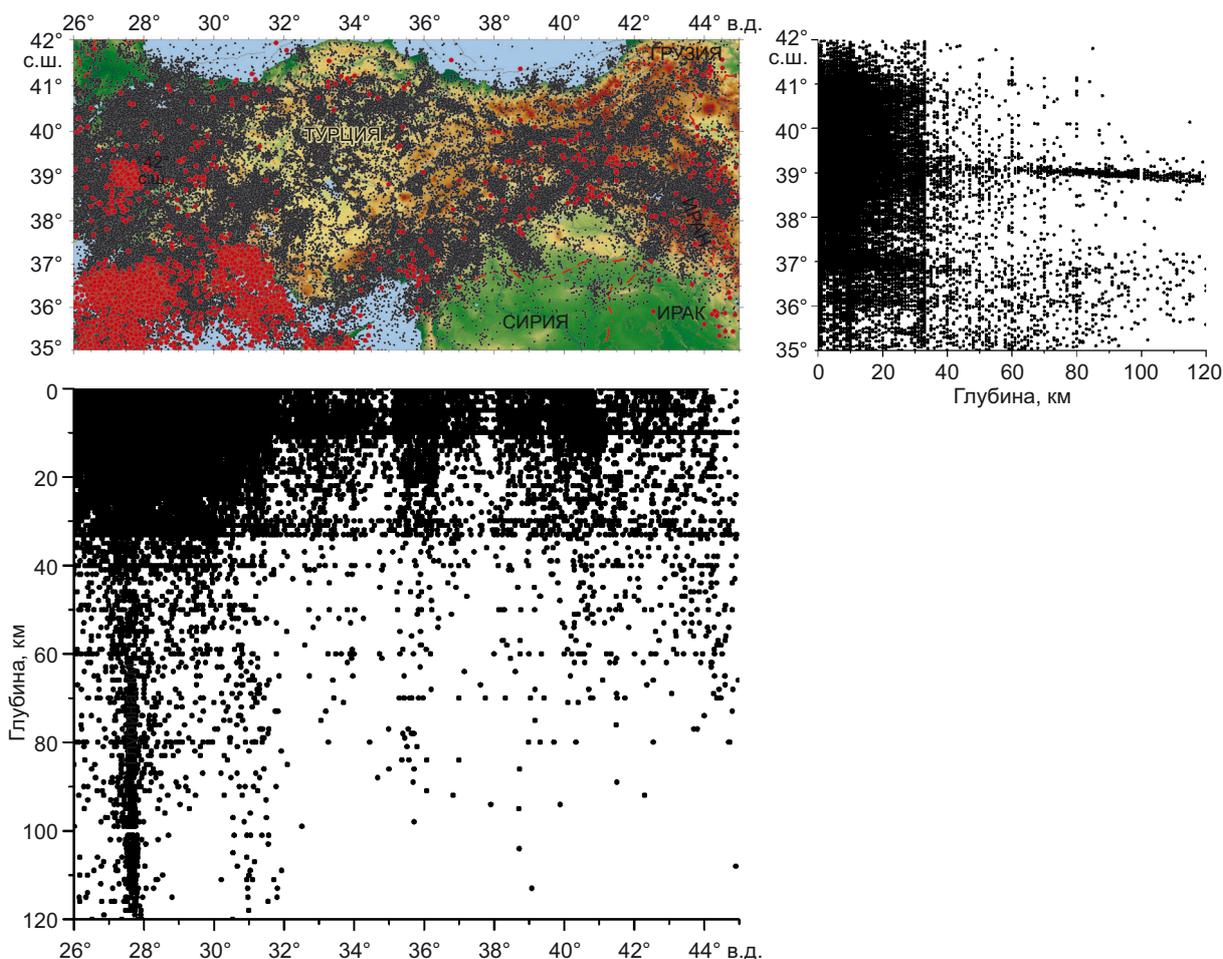


Рис. 3. Некоторые характеристики каталога землетрясений – эпицентры землетрясений и их проекции на вертикальную плоскость в направлении север–юг и запад–восток. Красным цветом обозначены события с глубиной >50 км.

Fig. 3. Some characteristics of the earthquake catalog – the epicenters of earthquakes and their projections on a vertical plane in the north-south and west-east directions. Events with a depth of >50 km are indicated in red.

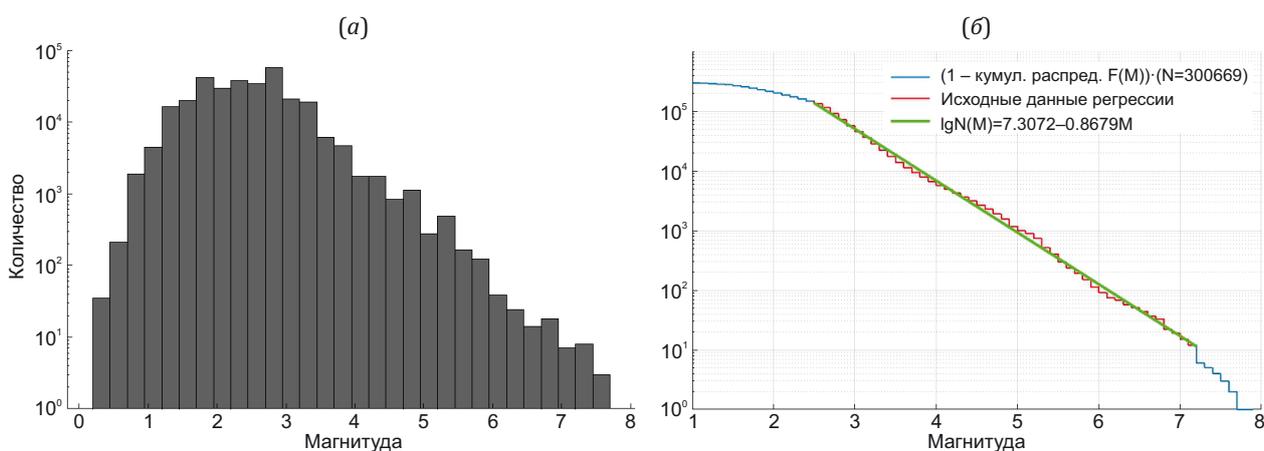


Рис. 4. График повторяемости (а) и распределение Гутенберга-Рихтера [Gutenberg, Richter, 1944] (б) землетрясений из каталога [B.U. KOERI-RTMC..., 2023].

Fig. 4. Recurrence plot (a) and Gutenberg-Richter [Gutenberg, Richter, 1944] distribution (б) of earthquakes from the catalog [B.U. KOERI-RTMC..., 2023].

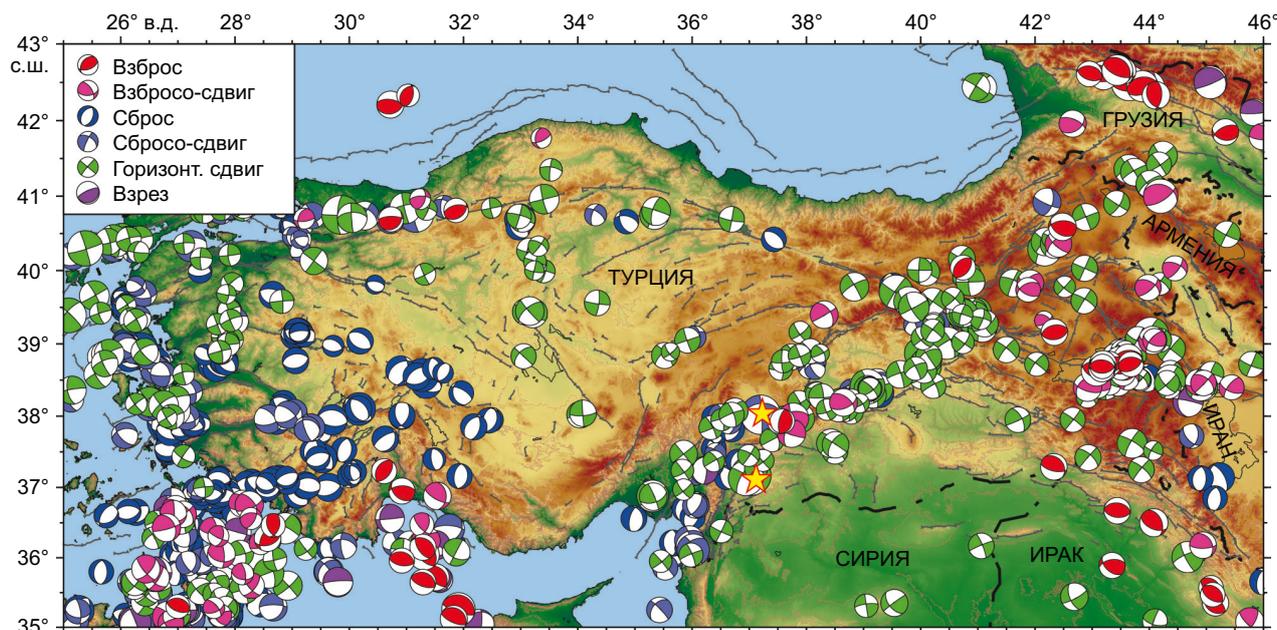


Рис. 5. Фокальные механизмы очагов землетрясений.
 Fig. 5. Earthquake focal mechanisms.

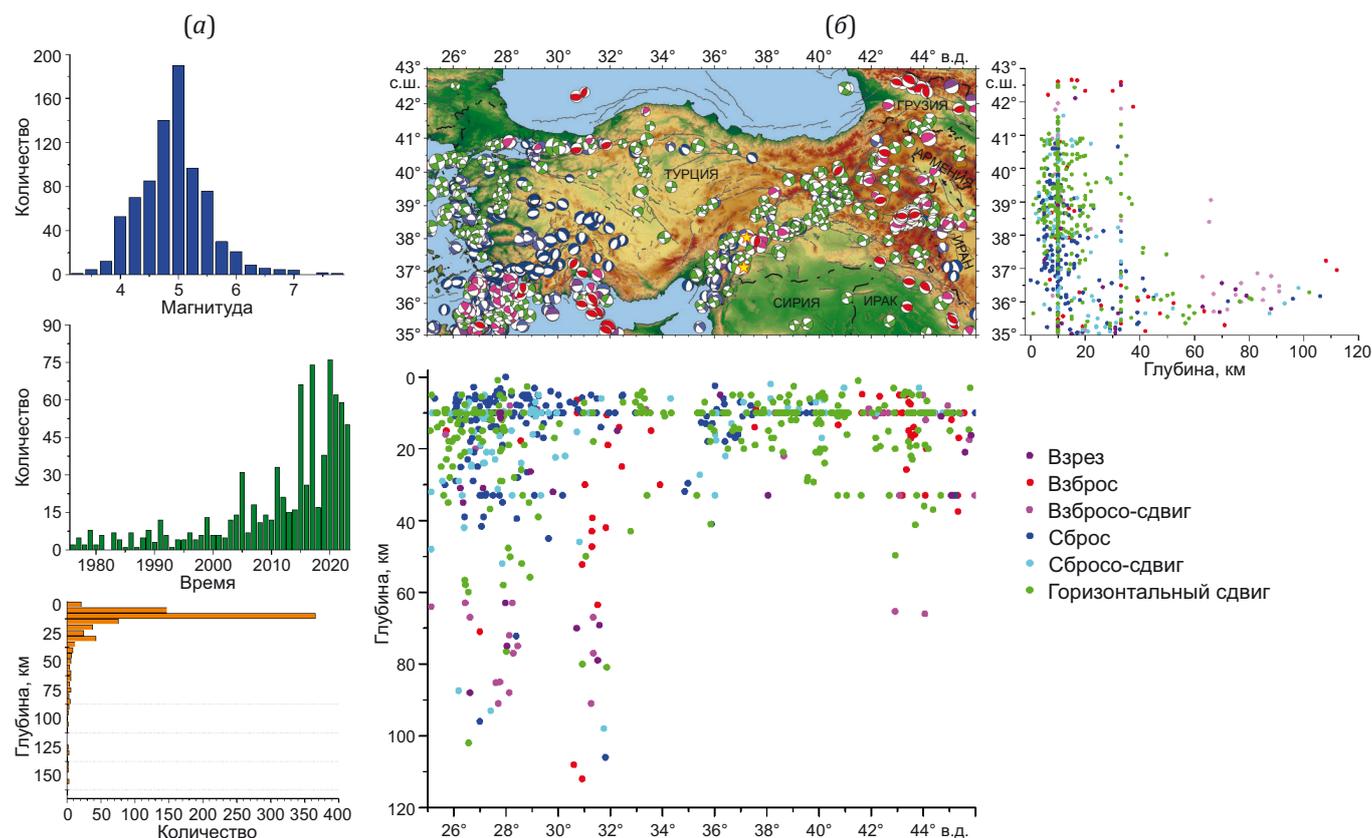


Рис. 6. Некоторые характеристики каталога фокальных механизмов.
 (а) – количественное распределение землетрясений по магнитуде, времени и глубине; (б) – эпицентры землетрясений и их проекции на вертикальную плоскость в направлении север–юг и запад–восток.

Fig. 6. Some characteristics of the catalog of focal mechanisms.
 (а) – quantitative distribution of earthquakes by magnitude, time and depth; (б) – earthquake epicenters and their projections onto the vertical plane in the north–south and west–east directions.

На рис. 5 представлены фокальные механизмы из КФМ. Цвет механизма соответствует типу подвижки в очаге (см. врезку к рис. 5). Тип подвижки определяется положением главных осей напряжений, которые характеризуются углом простирания (azimuth) и углом погружения (plunge).

На рис. 6, а, представлены некоторые статистические характеристики КФМ: основную часть каталога составляют события с $4 \leq M \leq 5.5$ (рис. 6, а, сверху), которые произошли с 1976 по 2023 г. (рис. 6, а, центральная часть). Наиболее представительными являются данные последнего десятилетия. Максимальное число событий произошло на глубине 10 км (рис. 6, а, снизу).

Для КФМ также построены проекции землетрясений на вертикальную плоскость по двум разрезам (рис. 6, б), цвет положения землетрясения зависит от типа подвижки (соответствует легенде на рис. 6, б). Построения позволяют отметить глубины, на которых происходят землетрясения с тем или иным типом подвижки. В восточной части Турции горизонтальный сдвиг, сбросы и взбросы происходят на глубине 0–35 км. В западной части Турции горизонтальный сдвиг и сбросы происходят до глубины ~40 км, для взбросов максимальная глубина составляет 60 км. Для глубокофокусных землетрясений характерны взбросы и взбросо-сдвиги.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

Высокая сейсмичность и сильные землетрясения (см. рис. 2) указывают на активные геодинамические процессы, протекающие на территории Турции. Для того чтобы оценить некоторые их характеристики, были построены площадные распределения сейсмической активности (количество землетрясений, про-

исходящих в год на единице площади), интенсивности STD, I_y , параметра сейсмогенных разрывов K_{cp} и параметра Тсаллиса q .

Расчет вышеперечисленных параметров на исследуемой территории выполнялся для каждой ячейки размером $1 \times 1^\circ$, сдвиг 1° . При расчете рассматривалась представительная часть каталога.

На рис. 7 представлено распределение количества землетрясений в год на исследуемой территории. Максимальное число соответствует ячейкам с центром 27.5° в.д. и 39.5° с.ш. и 29.5° в.д. и 39.5° с.ш. (провинция Балыкесир, западная часть Турции). Согласно [List..., 2023] в этой области произошло девять землетрясений с $M \geq 6$, в том числе Айвалыкское землетрясение, произошедшее 18 ноября 1919 г. с $M=7$ [List..., 2023]. Темно-зеленым цветом на рис. 7 показаны ячейки, в которых происходит более 20 землетрясений в год. Высокий уровень сейсмичности характерен для западной части Турции. На этой территории наблюдается плотная сетка разломов, значительная часть которых, согласно [Emre et al., 2013], являются активными. Также высокой сейсмичностью сопровождаются САРЗ и ВАРЗ.

На врезке рис. 7 показана карта сейсмического риска для территории Турции [Gunes, 2015]. Область активной сейсмичности повторяет форму территории с высокой степенью риска (отмечена красным цветом на врезке). Звездочками на карте обозначены эпицентры землетрясений с $M \geq 7$ из каталога землетрясений (1900–2022 гг.), большая часть расположена в западной части Турции и вдоль САРЗ. Несмотря на высокую сейсмичность вдоль ВАРЗ (см. рис. 2, I), на ее территории, согласно каталогу землетрясений за период 1900–2022 гг., не происходили землетрясения с $M \geq 7$. На рис. 1, б, показаны исторические доинструментальные землетрясения [Ambraseys, 1989], а на рис. 2, II,

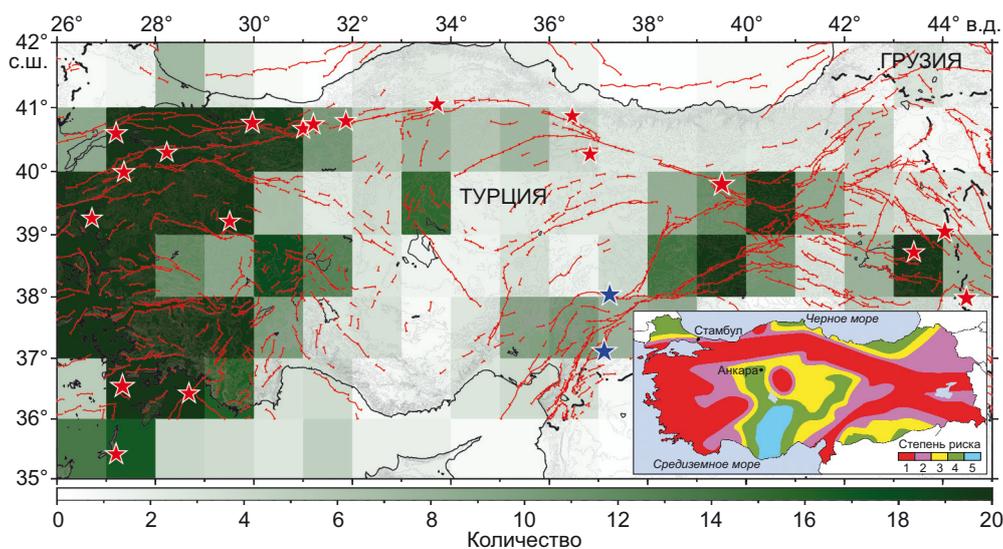


Рис. 7. Распределение количества землетрясений в год по данным каталога землетрясений. Звездочки – эпицентры землетрясений: красный цвет – события с $M \geq 7$. На врезке представлена карта сейсмического риска Турции.

Fig. 7. Distribution of the annual numbers of earthquakes according to the earthquake catalog. Asterisks indicate the epicenters of earthquakes; red stands for the events with $M \geq 7$. The inset shows the seismic risk map for Turkey.

показаны землетрясения из [List..., 2023], которые происходили в ее северной части с $M \geq 6$. Землетрясения, произошедшие 6 февраля 2023 г. в южной части ВАРЗ, – единственные землетрясения такой магнитуды.

В связи с землетрясениями, произошедшими 6 февраля 2023 г., вызывает интерес оценка сейсмического режима в западной и восточной части Турции в ближайшие десятилетия. Количественный анализ сейсмичности выполнен для двух областей: западной (35–42° с.ш. – 26–35° в.д.) и восточной части Турции (35–42° с.ш. – 35–45° в.д.), граница проходит по 35-му меридиану. В восточной части отдельно рассматривается область землетрясений 6 февраля 2023 г. (35–39° с.ш. – 36–39° в.д.). Границы рассматриваемых областей отмечены на рис. 8 бирюзовым цветом. Количественный анализ проведен для двух временных периодов: 1997–2009 гг. (13 лет) и 2010–2022 гг. (13 лет). Для каждой области рассчитывались следующие характеристики:

количество землетрясений за весь период, среднее количество землетрясений в год, среднее количество землетрясений в год в ячейке (1×1°), количество землетрясений с $M < 4$ и с $M \geq 4$. Перечисленные характеристики рассчитывались как по всему каталогу, так и по его представительной части. При рассмотрении всего каталога рассчитывалось количество землетрясений с $M < 3$ и с $M \geq 3$, так как полный каталог включает землетрясения малых магнитуд. Полученные результаты представлены в табл. 1.

На основании данных в таблице можно отметить следующее.

Весь каталог, период 1997–2009 гг.:

- ~25 % землетрясений произошло в восточной части и ~75 % в западной (западная часть территории Турции активнее восточной);
- количество землетрясений, произошедших в Малой восточной зоне, составляет ~27 % от всей Восточной зоны, количество землетрясений в ячейке Малой

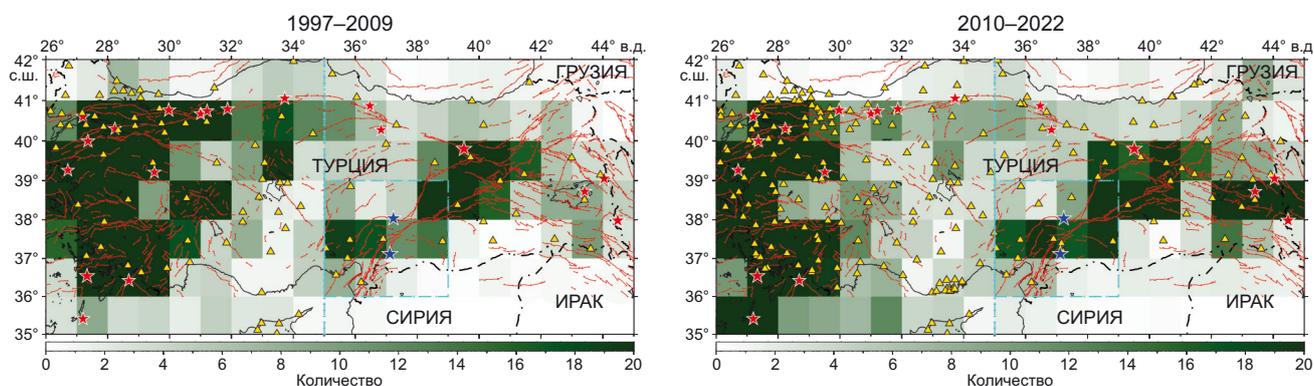


Рис. 8. Распределение количества землетрясений в год для двух периодов времени. Треугольниками показано положение сейсмических станций: слева – 101 станция, справа – 249 станций.

Fig. 8. Distribution of the annual number of earthquakes for two periods of time. Triangles mark the locations of seismic stations: on the left – 101 stations, on the right – 249 stations.

Таблица 1. Некоторые количественные характеристики сейсмичности отдельных зон Турции для временных периодов 1997–2009 гг. и 2010–2022 гг.

Table 1. Some quantitative characteristics of seismicity for certain zones of Turkey during two periods of time, 1997–2009 and 2010–2022

		Все землетрясения каталога								
		1997–2009 гг.				2010–2022 гг.				
	N	N/год	Ячейка	M<3	M≥3	N	N/год	Ячейка	M<3	M≥3
1	43936	3379	62.57	27588	16343	172337	13256	245.4	160659	11678
2	14515	1116	18.66	6554	7961	62739	4826	80.43	55928	6811
3	4028	309	25.75	2091	1937	18644	1434	119.5	17353	1291
		Представительная часть каталога (M≥2.5)								
	Всего	N/год	Ячейка	M<4	M≥4	Всего	N/год	Ячейка	M<4	M≥4
1	40776	3136	51.15	40259	517	35891	2760	46.25	35002	889
2	13849	1065	15.0	13451	398	21816	1678	22.12	21007	739
3	3694	284	23.67	3594	100	4579	352	27.25	4438	141

Примечание. 1 – западная часть Турции (35–42° с.ш. – 26–35° в.д.); 2 – восточная часть Турции (35–42° с.ш. – 35–45° в.д.); 3 – Малая восточная зона (35–39° с.ш. – 36–39° в.д.).

Note. 1 – western part of Turkey (35–42° N, 26–35° E); 2 – eastern part of Turkey (35–42° N, 35–45° E); 3 – small eastern area (35–39° N, 36–39° E).

восточной зоны составляет ~26 событий, для всей восточной части ~19 (Малая восточная зона активнее, чем вся Восточная);

- количество землетрясений с $M \geq 3$ составляет 37 % для западной части Турции от общего числа событий на этой территории и 54 % для восточной (13 % из которых произошли в Малой восточной зоне) (в восточной части Турции процентное соотношение землетрясений с $M \geq 3$ больше, чем в западной).

Период 2010–2022 гг.:

- ~25 % землетрясений произошло в восточной части и ~75 % – в западной (западная часть территории Турции активнее восточной);

- количество землетрясений в Малой восточной зоне составляет ~30 % от всей Восточной зоны, в ячейке Малой восточной зоны происходит ~120 событий в год, в Восточной зоне ~80;

- количество землетрясений с $M \geq 3$ составляет 7 % для западной части Турции и 10 % – для восточной (2 % из которых произошли в Малой восточной зоне) от общего числа событий (в восточной части Турции процентное соотношение землетрясений с $M \geq 3$ больше, чем в западной).

Представительная часть каталога, период 1997–2009 гг.:

- ~25 % землетрясений произошло в восточной части и ~75 % – в западной (западная часть территории Турции активнее восточной);

- количество землетрясений в Малой восточной зоне составляет 27 % от всей Восточной зоны, а количество землетрясений в ячейке Малой восточной зоны

составляет ~24, для всей восточной части ~15 (Малая восточная зона активнее, чем вся восточная);

- количество землетрясений с $M \geq 4$ от общего числа событий для Западной зоны составляет 1.2 %, для Восточной – 2.8 % (0.7 % из которых произошли в Малой восточной зоне) (в восточной части Турции процентное количество событий с $M \geq 4$ больше, чем в западной).

Период 2010–2022 гг.:

- ~38 % землетрясений произошло в восточной части и ~62 % – в западной (увеличение количества землетрясений в восточной части по отношению к предыдущему периоду);

- количество землетрясений в Малой восточной зоне составляет 21 % от всей Восточной зоны, а количество землетрясений в ячейке составляет ~27, для всей восточной части ~22 (Малая восточная зона активнее, чем вся восточная);

- количество землетрясений с $M \geq 4$ от общего числа событий составляет 2.5 % для Западной зоны, 3.4 % для Восточной (0.6 % из них произошло в Малой восточной зоне) (увеличение числа событий с $M \geq 4$ в западной и восточной части по сравнению с периодом 1997–2009 гг.).

Наряду с общим количеством землетрясений по рассматриваемым областям рассчитывались гистограммы распределения землетрясений по годам за указанные выше периоды. Полученные результаты представлены на рис. 9. По всем трем областям наблюдается значительное увеличение количества землетрясений в период с 2010 по 2022 г. по сравнению с периодом

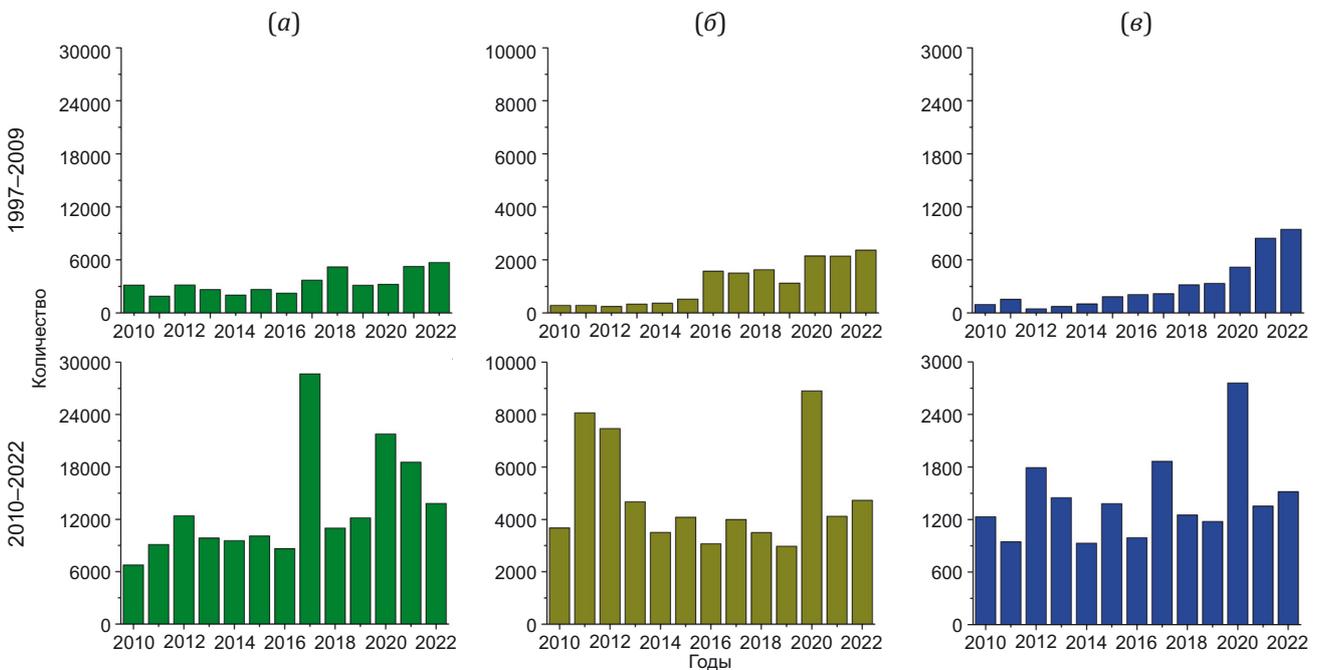


Рис. 9. Распределение количества землетрясений по годам для двух периодов времени. (а) – Западная Турция; (б) – Восточная Турция; (е) – Малая восточная зона, в которой произошли землетрясения 6 февраля 2023 г. с $M_w=7.8$ и $M_w=7.5$.

Fig. 9. Annual distribution of the number of earthquakes for two periods of time. (a) – Western Turkey; (b) – Eastern Turkey; (e) – small eastern area which experienced $M_w=7.8$ and $M_w=7.5$ earthquakes on February 6, 2023.

1997–2009 гг. Такое увеличение количества землетрясений может быть связано как с изменениями геодинамического режима, так и с увеличением количества сейсмических станций, которые повысили регистрационные возможности сети. На рис. 8, а, представлено положение 111 станций сети, которые по данным [B.U. KOERI-RTMC..., 2023] работали или были установлены на исследуемой территории в указанный период. На рис. 8, б, показаны станции, которые уже работали (111 станций, 1997–2009 гг.) или установлены на исследуемой территории с 2010 по 2020 г. (148 станций). Во второй рассматриваемый временной период значительно увеличилось количество сейсмических станций в крайней западной части Турции. Плотность станций в центральной и восточной части увеличилась незначительно. Это позволяет сделать предположение о том, что существенный рост землетрясений в период с 2010 по 2022 г. по сравнению с периодом с 1997 по 2009 г. можно связать и с изменением геодинамической обстановки.

Параметр Тсаллиса, рассчитанный для всего каталога, имеет значение $q=1.52$, что согласуется с его значениями, полученными для других сейсмоактивных регионов [Silva et al., 2006; Telesca, Chen, 2010; и др.]. Более того, все значения q , полученные для разных сейсмоактивных регионов мира, составляют $\approx 1.5-1.7$, что свидетельствует об универсальности этой постоянной [Posadas, Sotolongo-Costa, 2023]. Площадное распределение этого параметра позволяет оценить стабильность активной тектонической зоны и ее составляющих областей (рис. 10, б). Несмотря на высокую сейсмичность значительной части территории Турции, отмечается неоднородность исследуемого параметра. Его минимальное значение составляет 0.95, максимальное – 1.63. Основная часть областей, где произошли сильные землетрясения с $M \geq 7$ (красные звездочки), характеризуется значением параметра Тсаллиса $q \geq 1.56$,

что указывает на нестабильное состояние этих территорий. Активный сейсмический процесс продолжается, и сейсмогенерирующие зоны еще не вернулись в состояние относительного равновесия. Примечательной является область будущих землетрясений 6 февраля 2023 г. Для этой области значение параметра Тсаллиса имеет $q=1.4$ (ниже, чем для всего каталога, $q=1.52$). Такое значение q наблюдается только в асейсмичной части Анатолийской плиты. Если рассматривать ВАРЗ, то выше области будущих землетрясений значение параметра Тсаллиса $q > 1.5$, что также характеризует ее как сейсмически активную (в этой части происходили землетрясения с $M > 6$, см. рис. 2, II), в которой происходит разгрузка напряжений. Более низкое значение параметра q в области будущих землетрясений может означать отсутствие активной разгрузки и накопление напряжений, связанное с движением Аравийской плиты на северо-запад (см. рис. 1, а). Как отмечено в статье [Aktug et al., 2016], этот участок имеет очень высокий сейсмический потенциал.

Интенсивность СТД. Интенсивность СТД рассчитана на основе КФМ. В список анализируемых событий включены землетрясения, произошедшие 6 февраля 2023 г. и их афтершоки (всего 50 событий). Распределение логарифма интенсивности СТД на исследуемой территории с учетом 2023 г. и без него представлено на рис. 11. В табл. 2 показаны значения интенсивности СТД, полученные по всему каталогу землетрясений, и интенсивность СТД в области землетрясений 6 февраля 2023 г. До 2023 г. максимальное значение интенсивности СТД ($6.8 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹) приходится на провинцию Коджаэли, где 17 августа 1999 г. произошло катастрофическое землетрясение с $M_w=7.6$ (рис. 11, а). После землетрясений 6 февраля 2023 г. максимум проявляется в провинции Газиантеп (рис. 11, б, 1.34×10^{-6} год⁻¹), до землетрясений интенсивность СТД в этой области имела порядок 10^{-9} год⁻¹ (табл. 2).

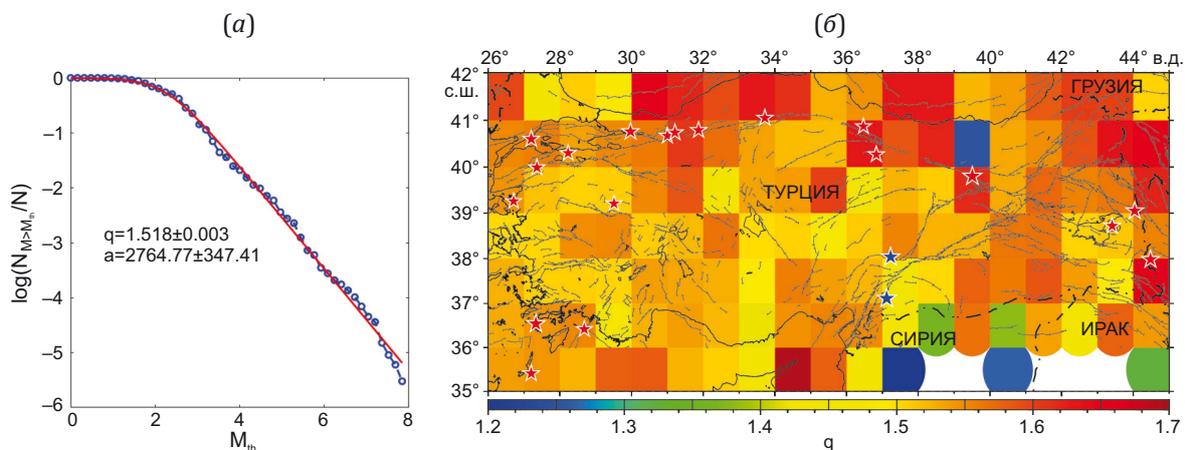


Рис. 10. График повторяемости (а), построенный по всему каталогу (синий цвет), и его аппроксимация (красный цвет). Площадное распределение параметра Тсаллиса q (б). Звездочки – эпицентры землетрясений: красный цвет – с $M \geq 7$, синий – произошедших 06.02.2023 г. с $M_w=7.8$ и $M_w=7.5$.

Fig. 10. Recurrence plot (a) drawn for the entire catalog (blue) and its approximation (red). Areal distribution of the Tsallis parameter q (b). Asterisks indicate the epicenters of earthquakes: red – with $M \geq 7$, blue – with $M_w=7.8$ and $M_w=7.5$, occurred on February 6, 2023.

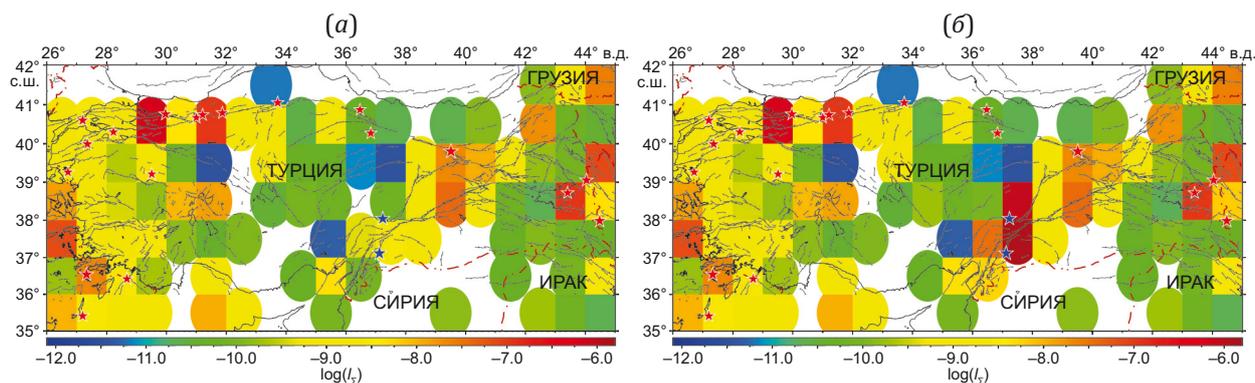


Рис. 11. Распределение логарифма интенсивности СТД, рассчитанное по каталогу фокальных механизмов без учета данных за 2023 г. (а) и с учетом 2023 г. (б).

Fig. 11. The distribution of the logarithm of the STD intensity calculated from the catalog of focal mechanisms without taking into account the data for 2023 (a) and taking into account the data for 2023 (b).

Таблица 2. Значение интенсивности СТД, рассчитанное по КФМ и по каталогу землетрясений
Table 2. STD intensity calculated from the FMC and from the earthquake catalog

Источник	Период	год ⁻¹				
		Мин.	Макс.	Сред.	Мед.	06.02.2023
КФМ	1976–2022 гг.	$3.51 \cdot 10^{-12}$	$6.80 \cdot 10^{-7}$	$1.40 \cdot 10^{-8}$	$5.51 \cdot 10^{-10}$	$2.72 \cdot 10^{-9}$
	1976–2023 гг.	$3.44 \cdot 10^{-12}$	$1.34 \cdot 10^{-6}$	$3.81 \cdot 10^{-8}$	$6.24 \cdot 10^{-10}$	$1.34 \cdot 10^{-6}$
Каталог землетрясений	1900–2022 гг.	$8.81 \cdot 10^{-13}$	$3.31 \cdot 10^{-9}$	$5.76 \cdot 10^{-10}$	$3.31 \cdot 10^{-10}$	$1.8 \cdot 10^{-10}$
	1997–2009 гг.	$1.77 \cdot 10^{-12}$	$1.01 \cdot 10^{-8}$	$6.40 \cdot 10^{-10}$	$1.37 \cdot 10^{-10}$	$1.5 \cdot 10^{-10}$
	2010–2022 гг.	$3.93 \cdot 10^{-13}$	$1.57 \cdot 10^{-8}$	$9.21 \cdot 10^{-10}$	$1.72 \cdot 10^{-10}$	$7.4 \cdot 10^{-10}$

Примечание. 06.02.2023 – обозначена ячейка (с центром 37.5° с.ш., 37.5° в.д.), в которой произошли землетрясения 6 февраля 2023 г.
 Note. 06.02.2023 marks a cell (with coordinates of the center 37.5° N, 37.5° E) where the February 6, 2023 earthquakes occur.

Интенсивность СТД является количественной характеристикой. Зная магнитуду землетрясения, можно рассчитать значение скалярного сейсмического момента. Расчет интенсивности СТД выполняется суммированием скалярных сейсмических моментов в пределах каждой области согласно [Lukk, Yunga, 1979]. Это дает возможность для ее расчета использовать данные из каталога землетрясений. Распределение «фоновой» интенсивности СТД для двух рассматриваемых периодов: 1997–2009 гг. и 2020–2022 гг., рассчитанное на основе анализа сейсмических событий с $2.5 \leq M < 6.0$ из каталога землетрясений, представлено на рис. 12. В этой же таблице представлены результаты, полученные по всему каталогу землетрясений.

Фоновая интенсивность СТД в области землетрясений 6 февраля 2023 г. (провинция Газиантеп) за весь период наблюдений имеет значение $1.8 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹, за период 1997–2009 гг. – $1.5 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹ и за последний период наблюдений (2010–2022 гг.) – $7.4 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹. Все эти значения ниже, чем среднее значение интенсивности СТД для исследуемой территории за те же периоды. Только в последнее десятилетие наблюдается незначительное повышение интенсивности СТД на полпорядка.

В работах [Sobolev, Zavyalov, 1980; Zavyalov, 2006] параметр концентрации сейсмогенных разрывов, K_{cp} , используется с целью прогноза землетрясений. В данной работе использование этого параметра обусловлено тем, что он может отражать две предыдущие характеристики вместе, так как в расчете этого параметра участвует как количество землетрясений, происходящих в объеме, так и класс (или магнитуда) землетрясения. На рис. 13 представлено распределение K_{cp} . Синий цвет на карте соответствует низкому значению исследуемого параметра (легенда к рис. 13), что указывает на высокое значение концентрации трещин (сейсмогенных разрывов).

Параметр концентрации сейсмогенных разрывов K_{cp} по своей природе носит кумулятивный характер и определяет условие неустойчивости. Чем ниже его значение, тем выше неустойчивость процесса деформации. Значение K_{cp} для ячейки, где произошли февральские землетрясения, выше, чем в областях расположения землетрясений с $M \geq 7$, и выше, чем в северной части ВАРЗ, где происходили сильные события, что может указывать на отсутствие достаточной разгрузки напряжений (сейсмических разрывов) в этой части ВАРЗ.

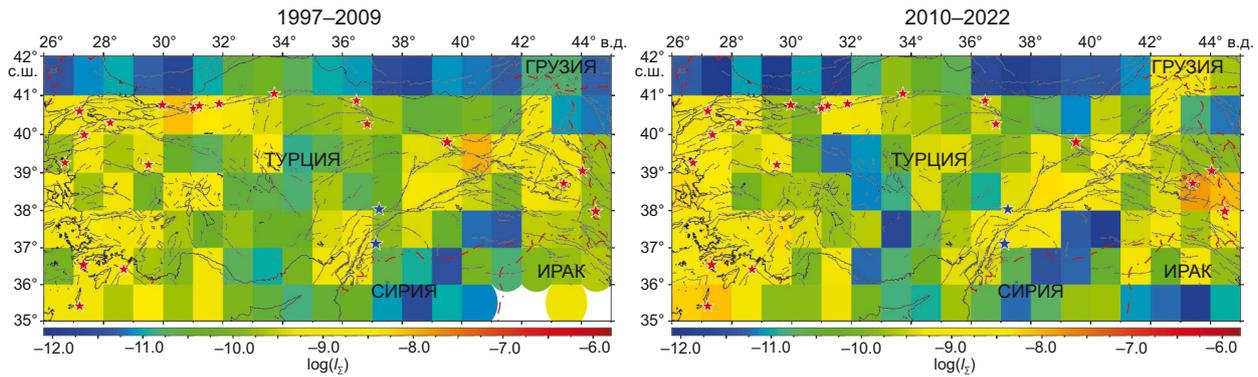


Рис. 12. Распределение логарифма интенсивности STD для двух периодов времени.

Fig. 12. Distribution of the logarithm of STD intensity for two periods of time.

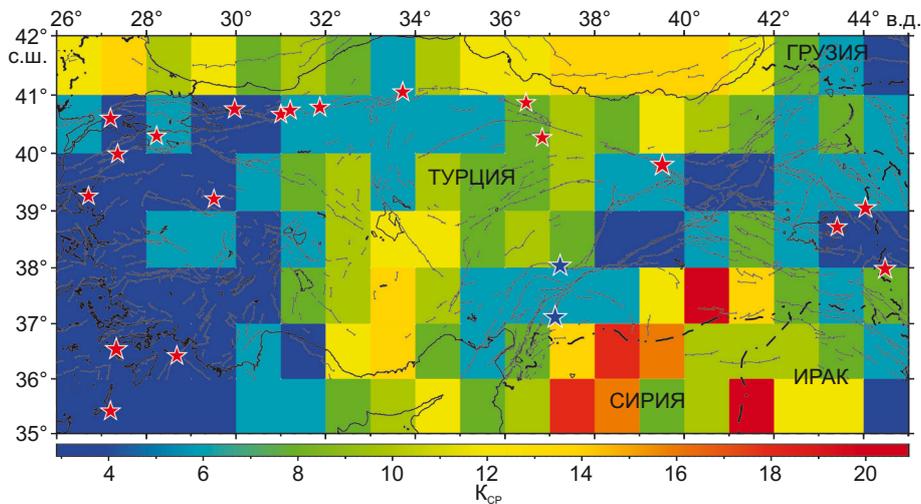


Рис. 13. Распределение параметра K_{cp} по данным каталога землетрясений.

Fig. 13. Distribution of the K_{cp} parameter according to the data of the earthquake catalog.

При расчете STD геоструктурная область подразделяется на элементарные подобласти с радиусом $r=0.5^\circ$, центры которых размещаются в узлах (узловые точки) сетки с шагом 0.5° (~ 50 км), что обеспечивает сглаживание данных. Область с $r=0.5^\circ$ также может потенциально представлять собой зону подготовки сильного землетрясения (диаметр 100 км).

На рис. 14 представлена карта STD. Ориентация прямоугольника и стрелок на горизонтальной поверхности позволяет судить соответственно об азимутальном направлении осей укорочения и удлинения. Цвет значка означает режим STD (справа от карты представлены режимы STD согласно схеме классификации [Yunga, 1997], а снизу – название режимов деформации).

На территории Турции можно отметить разнообразие режимов STD. В прибрежной западной части Турции, в области, расположенной полукругом (по форме береговой линии), наблюдается режим горизонтального сдвига, который при движении на восток сменяется режимом трансенсии, для юго-западной части характерен режим растяжения. В центральной части

Анатолийской плиты расположена сейсмичная зона, вытянутая с юга на север, которая характеризуется режимом горизонтального сдвига. На севере, вдоль Северо-Анатолийского разлома, есть локальные области с режимом трансенсии и переходным режимом от вертикального сдвига к растяжению. Область, включающая оз. Ван и ближайшее окружение, характеризуется режимом транспрессии. Южная часть ВАРЗ характеризуется режимом трансенсии, а в центральной и северной ее части проявляется режим горизонтального сдвига. Положение эпицентров землетрясений, произошедших 6 февраля 2023 г., совпадает с северо-восточной границей области, расположенной в южной части ВАРЗ с режимом трансенсии. В крайней восточной части Турции оси укорочения имеют северное направление. Вдоль ВАРЗ направление осей укорочения – северо-северо-восточное. Северная часть Турции характеризуется северо-западным направлением осей укорочения, которое меняется на субширотное в западной части.

Для сравнения результатов, полученных методом STD, приведены результаты расчета поля скорости

деформации, выполненные в работе [Güral et al., 2013] для сейсмически активной зоны разлома Фетхие-Бурдур (ФБРЗ). Юго-Западная Анатолия, включая зону ФБРЗ, контролируется 44 станциями ГНСС, состоящими из 16 постоянных и 28 агитационных станций. Измерения были проведены путем объединения наблюдений за период с 2003 по 2006 г. [Erdogan et al., 2009] с новыми наблюдениями за 2009 и 2010 гг. На рис. 15 приведена карта СТД (рис. 15, а) и поле скорости гори-

зонтальной деформации (рис. 15, б) [Güral et al., 2013]; для обеих карт синим цветом обозначено направление оси удлинения, красным – направление оси укорочения. Отсутствие численных данных по ГНСС измерениям не позволяет выполнить количественную оценку согласованности направлений осей укорочения и удлинения по сейсмическим (СТД) и ГНСС-данным. Визуальное сравнение направлений осей укорочения и удлинения в областях, где модели деформации представлены

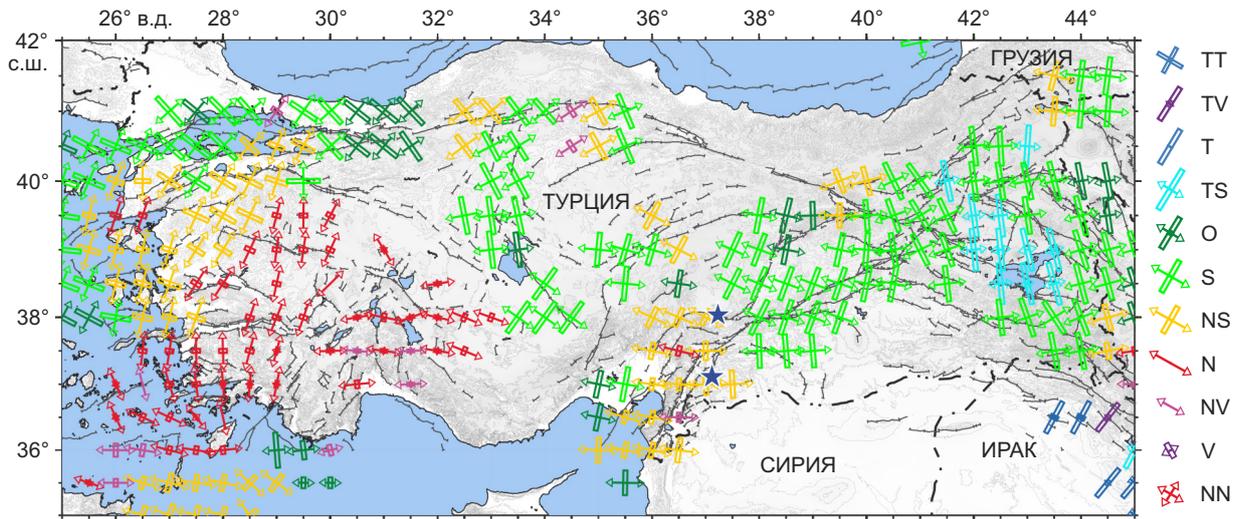


Рис. 14. Карта СТД.

Режимы СТД: TT – всестороннее сжатие, TV – переходный режим от вертикального сдвига к сжатию, T – сжатие, TS – транспрессия, O – косой сдвиг, S – горизонтальный сдвиг, NS – транстенсия, N – растяжение, NV – переходный режим от вертикального сдвига к растяжению, V – вертикальный сдвиг, NN – всестороннее растяжение.

Fig. 14. STD map.

STD modes: TT – all-round compression, TV – transitional mode from vertical shift to compression, T – compression, TS – transpression, O – oblique, S – horizontal shift, NS – transtension, N – tension, NV – transitional mode from vertical shift to tension, V – vertical shift, NN – all-round tension.

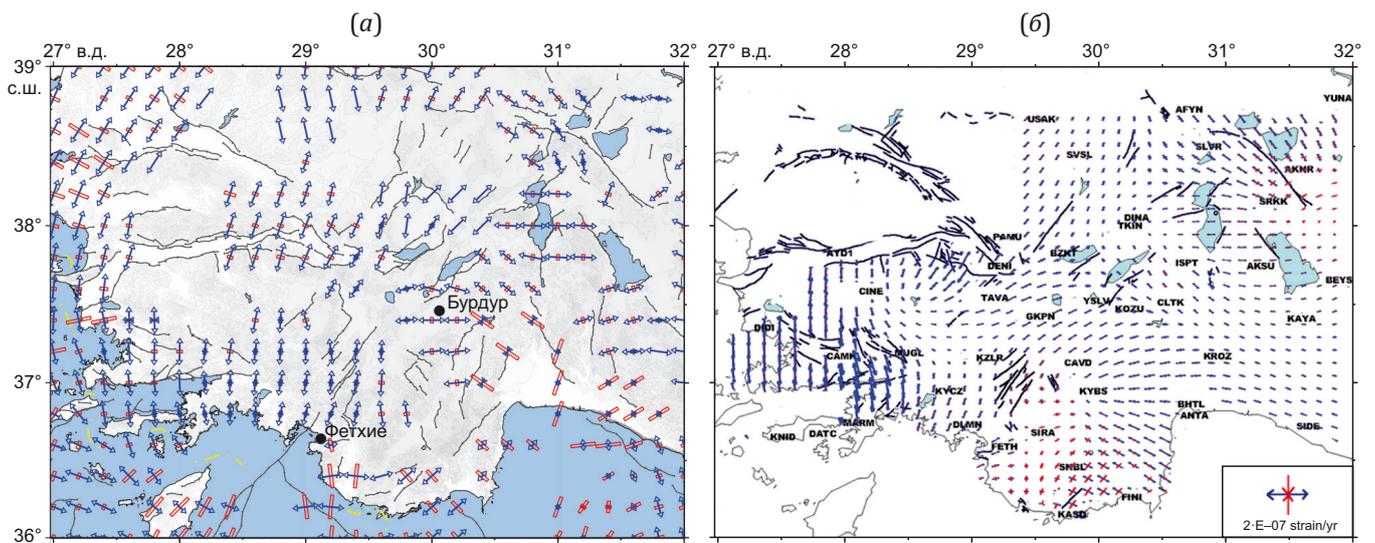


Рис. 15. Карта СТД (а) и скорость горизонтальной деформации (б), рассчитанная по векторам скоростей в зоне разлома Фетхие-Бурдур по [Güral et al., 2013].

Fig. 15. STD map (a) and horizontal strain rate (б) calculated from velocity vectors in the Fethiye-Burdur Fault Zone after [Güral et al., 2013].

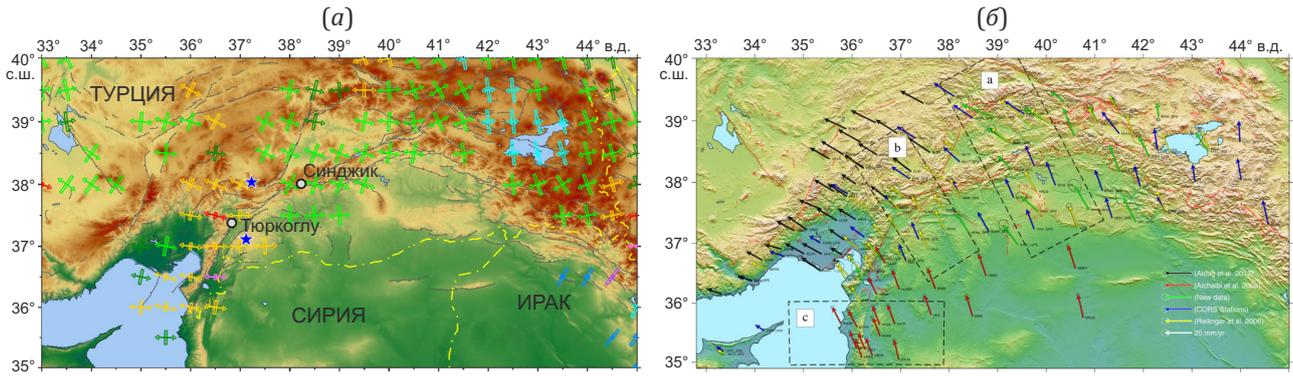


Рис. 16. Карта СТД (а) и поле скоростей (б) для ВАРЗ по [Aktug et al., 2016].
Fig. 16. STD map (a) and velocity field (б) for the EAFS after [Aktug et al., 2016].

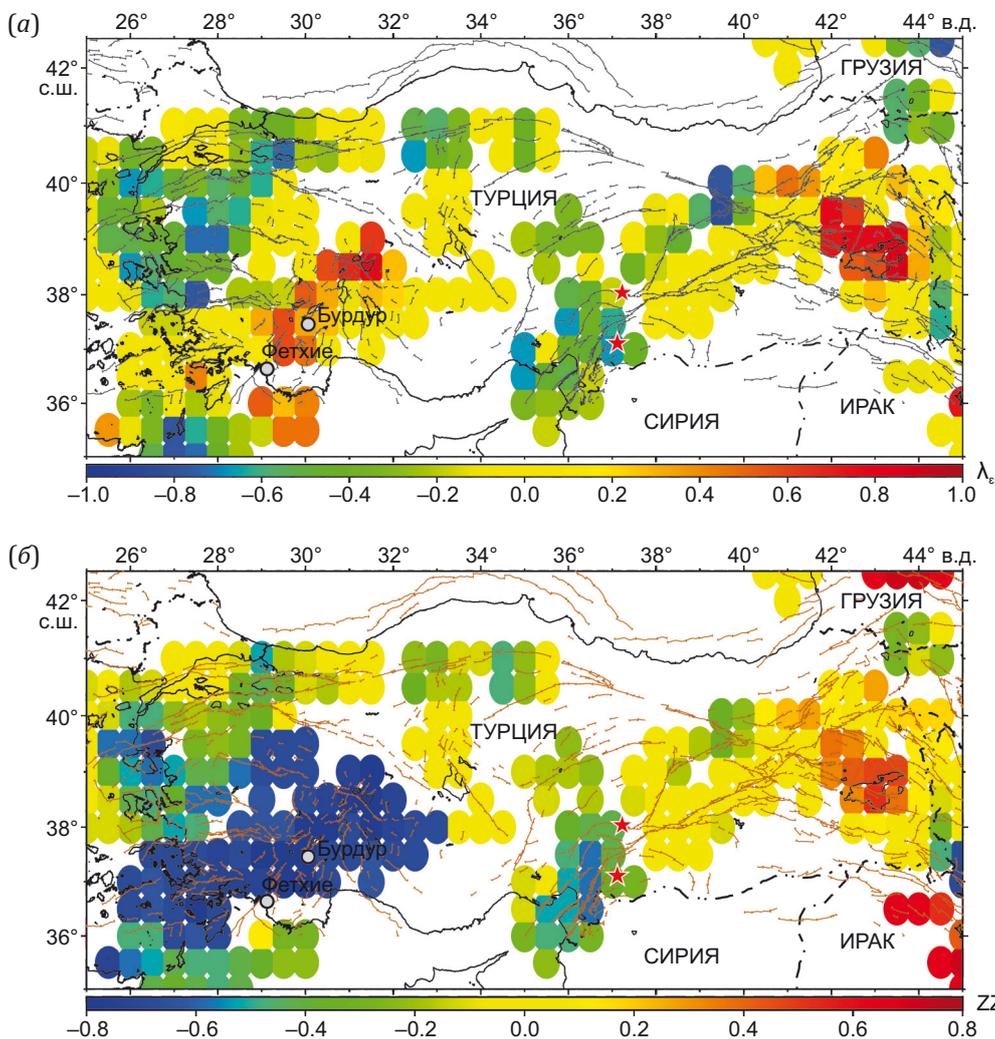


Рис. 17. Распределение коэффициента Лодэ – Надаи μ_e (а) и вертикальной компоненты ZZ усредненных тензоров деформации (б). Связь значения коэффициента Лодэ – Надаи с режимом СТД: $0.6 < m_e \leq 1.0$, красный цвет – простое сжатие; $0.2 < m_e \leq 0.6$, оранжевый – преобладание простого сжатия; $-0.2 < m_e \leq +0.2$, желтый – простой сдвиг; $-0.6 \leq m_e < -0.2$, зеленый – преобладание простого растяжения; $-1.0 \leq m_e < -0.6$, синий – простое растяжение.

Fig. 17. Distribution of Lode – Nadai coefficient μ_e (a) and vertical component ZZ of the average strain tensors (б). Relationship between the Lode – Nadai coefficient and the STD regime: $0.6 < m_e \leq 1.0$, red – simple compression; $0.2 < m_e \leq +0.6$, orange – predominance of simple compression; $-0.2 < m_e \leq 0.2$, yellow – simple shift; $-0.6 \leq m_e < -0.2$, green – predominance of simple tension; $-1.0 \leq m_e < -0.6$, blue – simple tension.

по двум методам, позволяет отметить хорошую согласованность.

Для понимания кинематики Анатолийской плиты в работе [Aktug et al., 2016] выполнено определение скорости проскальзывания в ВАРЗ. В этом исследовании новые ГНСС-данные были собраны, проанализированы и объединены с уже известными скоростями, опубликованными в работах, что позволило сформировать наиболее полный набор данных ГНСС, охватывающий ВАРЗ.

На рис. 16 приведена карта СТД и поле скоростей, полученное в работе [Aktug et al., 2016]. На рис. 16, а, красными звездочками отмечены эпицентры землетрясений, которые произошли 6 февраля 2023 г., и населенные пункты, отмеченные в работе [Aktug et al., 2016] как опасные участки. В области будущих землетрясений наблюдаются более низкие скорости по данным ГНСС, чем севернее по ВАРЗ; по данным СТД в этой области проявляется режим транстенсии, а выше расположения провинции Синджик ВАРЗ характеризуется режимом горизонтального сдвига. Февральские землетрясения произошли на стыке смены одного режима деформации другим.

Распределение коэффициента Лодэ – Надаи представлено на рис. 17, а. Согласно легенде значительная часть территории Турции характеризуется режимом чистого сдвига ($-0.2 \leq \mu_\xi \leq +0.2$) и преобладания простого растяжения ($-0.6 < \mu_\xi < -0.2$). Режимом простого сжатия ($0.6 \leq \mu_\xi \leq 1$) характеризуются две небольшие области: одна находится в районе оз. Ван, другая – в западной части Турции вдоль ФБРЗ. Область, где 6 февраля 2023 г. произошли крупные землетрясения, характеризуется режимом преобладания простого растяжения.

Вертикальная компонента, которая визуально не отражается на картах направленности СТД, позволяет оценить изменение высоты рельефа. На большей части исследуемой территории она имеет отрицательное значение (опускание) или равна нулю, за исключением небольшой области, расположенной в окружении оз. Ван (восточная часть Турции) (рис. 17, б). В зоне рассматриваемых землетрясений 6 февраля 2023 г. (отмечены красными звездочками) происходит опускание земной коры.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе сейсмических данных и данных по фокальным механизмам землетрясений проведен анализ сейсмичности и напряженно-деформированного состояния земной коры территории Турции. По кумулятивному распределению Гутенберга – Рихтера представительными в каталоге землетрясений являются события с $M \geq 2.5$. Величина b -value составляет 0.87. По интегральным проекциям на вертикальную плоскость установлено, что землетрясения на исследуемой территории происходят на глубине 0–170 км, сейсмоактивный слой – 0–40 км, глубокофокусные землетрясения происходят в районе провинции Измир (выход к Эгейскому морю) и в прибрежных зонах Средиземного

морья, граничащих с провинциями Мигла и Анталия. Максимальное число землетрясений в год происходит в провинции Баликесир (западная часть Турции). В период с 1997 по 2009 г. в западной части Турции произошло 75 % землетрясений, а в восточной части – 25 % соответственно. В период с 2010 по 2022 г. произошло увеличение числа землетрясений в восточной части до 38 %.

Параметр Тсаллиса, рассчитанный по каталогу землетрясений, составляет 1.52 и согласуется со значениями, полученными для других сейсмоактивных регионов. Значение этого параметра в зоне землетрясений 6 февраля 2023 г. составило 1.4 (ниже, чем для всего каталога и для сейсмоактивных регионов), что указывает на отсутствие разгрузки напряжений в данной области до разрушительных событий 6 февраля 2023 г. Значение параметра K_{cr} для области, где впоследствии произошли февральские землетрясения, выше, чем в областях расположения эпицентров землетрясений с $M \geq 7$, и выше, чем в северной части ВАРЗ, где происходили сильные события, что также указывает на отсутствие достаточной разгрузки напряжений (сейсмических разрывов) в этой части ВАРЗ. Среднее значение фоновой интенсивности СТД территории Турции за весь период (1900–2022 гг.) наблюдений составляет $5.8 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹, в области будущих землетрясений 6 февраля 2023 г. интенсивность СТД ниже на полпорядка – $1.8 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹. В период с 1997 по 2009 г. интенсивность СТД в этой области составляет $1.5 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹ (ниже, чем за весь период), а с 2010 по 2022 г. – $7.4 \cdot 10^{-10}$ год⁻¹ (выше предыдущего периода на полпорядка). Интенсивность СТД в области землетрясений 6 февраля 2023 г., с учетом этих землетрясений, составляет $1.34 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹. На основе классификации режимов СТД построена карта СТД: наблюдается разнообразие режимов СТД: горизонтальный сдвиг (восточная и центральная часть Турции), транстенсия (южная часть ВАРЗ и прибрежная западная часть Турции), растяжение (юго-западная часть Турции), транспрессия (район расположения оз. Ван). Сравнение деформационных моделей для разлома Фетхие-Бурдур по методу СТД и ГНСС-данным показало хорошую совместимость направлений осей удлинения и укорочения. Значительная часть территории Турции характеризуется режимом простого сдвига, западная часть испытывает деформацию с преобладанием простого растяжения, а в окрестности оз. Ван происходит деформация с преобладанием простого сжатия. Западная часть Турции, а также южная часть ВАРЗ испытывают опускание территории, а область расположения оз. Ван – воздымание.

6. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Автор заявляет об отсутствии какого-либо конфликта интересов. Автор прочел и одобрил финальную версию перед публикацией.

The author has no conflicts of interest to declare. The author read and approved the final manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Aktug B., Ozener H., Dogru A., Sabuncu A., Turgut B., Halicioglu K., Yilmaz O., Havazli E., 2016. Slip Rates and Seismic Potential on the East Anatolian Fault System Using an Improved GPS Velocity Field. *Journal of Geodynamics* 94–95, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.01.001>.
- Allen M., Jackson J., Walker R., 2004. Late Cenozoic Reorganization of the Arabia-Eurasia Collision and the Comparison of Short-Term and Long-Term Deformation Rates. *Tectonics* 23 (2), TC2008. <https://doi.org/10.1029/2003TC001530>.
- Ambraseys N.N., 1989. Temporary Seismic Quiescence: SE Turkey. *Geophysical Journal International* 96 (2), 311–331. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1989.tb04453.x>.
- Arpat E., Saraglu F., 1972. The East Anatolian Fault System: Thoughts on its Development. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 78, 33–39.
- Bachmanov D.M., Kozhurin A.I., Trifonov V.G., 2017. The Active Faults of Eurasia Database. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 711–736 (in Russian) [Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736]. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>.
- Barka A.A., Kadinsky-Cade K., 1988. Strike-Slip Fault Geometry in Turkey and Its Influence on Earthquake Activity. *Tectonophysics* 7 (3), 663–684. <https://doi.org/10.1029/TC007i003p00663>.
- Berberian M., King G.C.P., 1981. Towards a Paleogeography and Tectonic Evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18 (2), 210–265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>.
- Bommer J., Spence R., Erdik M., Tabuchi S., Aydinoglu N., Booth E., del Re D., Peterken O., 2002. Development of an Earthquake Loss Model for Turkish Catastrophe Insurance. *Journal of Seismology* 6, 431–446. <https://doi.org/10.1023/A:1020095711419>.
- Bozkurt E., 2001. Neotectonics of Turkey – A Synthesis. *Geodynamica Acta* 14 (1–3), 3–30. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432432>.
- B.U. KOERI-RTMC Earthquake Catalog, 2023. Available from: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/moment-tensor-solutions> (Last Accessed March 12, 2023).
- Chelidze T., Vallianatos F., Telesca L. (Ed.), 2018. Complexity of Seismic Time Series: Measurement and Application. Elsevier, 548 p. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04546-1>.
- Dewey J.F., Hempton M.R., Kidd W.S.F., Saroglu F., Sengör A.M.C., 1986. Shortening of Continental Lithosphere: The Neotectonics of Eastern Anatolia – A Young Collision Zone. *Geological Society of London Special Publication* 19, 1–36. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1986.019.01.01>.
- Duman T.Y., Emre Ö., 2013. The East Anatolian Fault: Geometry, Segmentation and Jog Characteristics. *Geological Society of London Special Publication* 372, 495–529. <https://doi.org/10.1144/SP372.14>.
- Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmaci H., Olgun Ş., Şaroğlu F., 2013. Active Fault Map of Turkey with an Explanatory Text. 1:1250000 Scale. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara, 89 p.
- Erdik M., Kamer Y., Demircioglu M., Sesetyan K., 2012. 23 October 2011 Van (Turkey) Earthquake. *Natural Hazards* 64 (1), 651–665. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0263-9>.
- Erdogan S., Sahin M., Tiryakioglu I., Gulal E., Telli A.K., 2009. GPS Velocity and Strain Rate Fields in Southwest Anatolia from Repeated GPS Measurements. *Sensors* 9 (3), 2017–2034. <https://doi.org/10.3390/s90302017>.
- Global CMT Catalog, 2023. Available from: <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (Last Accessed March 12, 2023).
- Gök R., Pasyanos M.E., Zor E., 2007. Lithospheric Structure of the Continent – Continent Collision Zone: Eastern Turkey. *Geophysical Journal International* 169 (3), 1079–1088. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2006.03288.x>.
- Gunes O., 2015. Turkey's Grand Challenge: Disaster-Proof Building Inventory within 20 Years. *Case Studies in Construction Materials* 2, 18–34. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2014.12.003>.
- Gutenberg B., Richter C.F., 1944. Frequency of Earthquakes in California. *Bulletin of the Seismological Society of America* 34 (4), 185–188. <https://doi.org/10.1785/BSA0340040185>.
- Gülal E., Tiryakioglu I., Erdogan S., Aykut N.O., Baybura T., Akpınar B., Telli A.K., Ata E. et al., 2013. Tectonic Activity Inferred from Velocity Field of GNSS Measurements in Southwest of Turkey. *Acta Geodaetica et Geophysica* 48, 109–121. <https://doi.org/10.1007/s40328-012-0005-1>.
- Hempton M.R., 1985. Structure and Deformation History of the Bitlis Suture near Lake Hazar, Southeastern Turkey. *GSA Bulletin* 96 (2), 233–243. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96%3C233:SADHOT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96%3C233:SADHOT%3E2.0.CO;2).
- Hempton M.R., 1987. Constraints on Arabian Plate Motion and Extensional History of the Red Sea. *Tectonics* 6 (6), 687–705. <https://doi.org/10.1029/TC006i006p00687>.
- Hempton M.R., Dewey J.F., Saroglu F., 1981. The East Anatolian Transform Fault: Along Strike Variations in Geometry and Behavior. *EOS Transactions American Geophysical Union* 62, 393.
- Herece E., 2008. Dogu Anadolu Fay (DAF) Atlas, General Directorate of Mineral Research and Exploration. Special Publications 13, 359.
- Işık E., Ekinci Yu.L., Sayil N., Büyüksaraç A., Aydın M.C., 2021. Time-Dependent Model for Earthquake Occurrence and Effects of Design Spectra on Structural Performance: A Case Study from the North Anatolian Fault Zone. *Turkish Journal of Earth Sciences* 30 (2), 215–234. <https://doi.org/10.3906/yer-2004-20>.
- Jackson J., McKenzie D.P., 1984. Active Tectonics of the Alpine-Himalayan Belt between Western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal International* 77 (1), 185–264. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1984.tb01931.x>.
- Jackson J.A., McKenzie D.P., 1988. Rates of Active Deformation in the Aegean Sea and Surrounding Regions. *Basin Research* 1 (3), 121–128. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.1988.tb00009.x>.

Jaffey N., Robertson A.H.F., 2001. New Sedimentological and Structural Data from the Ecemis Fault Zone, Southern Turkey: Implications for Its Timing and Offset and the Cenozoic Tectonic Escape of Anatolia. *Journal of the Geological Society* 158 (2), 367–378. <https://doi.org/10.1144/jgs.158.2.367>.

List of Earthquakes in Turkey, 2023. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_earthquakes_in_Turkey (Last Accessed April 3, 2023).

Lukk A.A., Shevchenko V.I., 2019. Seismicity, Tectonics, and GPS Geodynamics of the Caucasus. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 55, 626–648. <https://doi.org/10.1134/S1069351319040062>.

Lukk A.A., Shevchenko V.I., Leonova V.G., 2015. Autonomous Geodynamics of the Pamir–Tien Shan Junction Zone from Seismology Data. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth* 51, 859–877. <https://doi.org/10.1134/S1069351315040060>.

Lukk A.A., Yunga S.L., 1979. Seismotectonic Deformation of the Garm Region. *Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth* 10, 24–43 (in Russian) [Лукк А.А., Юнга С.Л. Сейсмотектоническая деформация Гармского района // Известия АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10. С. 24–43].

Lybérís N., Yürür T., Chorowicz J., Kasapoglu E., Gundogdu N., 1992. The East Anatolian Fault: An Oblique Collisional Belt. *Tectonophysics* 204 (1–2), 1–15. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90265-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90265-8).

McKenzie D.P., 1972. Active Tectonics of the Mediterranean Region. *Geophysical Journal International* 30 (2), 109–185. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1972.tb02351.x>.

Philip H., Cisternas A., Gvishiani A., Gorshkov A., 1989. The Caucasus: An Actual example of the Initial Stages of a Continental Collision. *Tectonophysics* 161 (1–2), 1–21. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(89\)90297-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(89)90297-7).

Posadas A., Sotolongo-Costa O., 2023. Non-Extensive Entropy and Fragment–Asperity Interaction model for Earthquakes. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* 117, 106906. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2022.106906>.

Reilinger R.E., McClusky S., Oral M.B., King W., Toksöz M.N., 1997. Global Positioning, System Measurements of Present-Day Crustal Movements in the Arabian–Africa–Eurasia Plate Collision Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102 (B5), 9983–9999. <https://doi.org/10.1029/96JB03736>.

Riznichenko Yu.V., 1985. Problems of Seismology. Nauka, Moscow, 408 p. (in Russian) [Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.].

Robertson A.H.F., 2000. Mesozoic–Tertiary Tectonic Sedimentary Evolution of a South Tethyan Oceanic Basin and Its Margins in Southern Turkey. In: E. Bozkurt, J.A. Winchester, J.D.A. Piper (Eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*. Geological Society of London Special Publication 173, p. 97–138. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.2000.173.01.05>.

Sandvol E., Turkelli N., Barazangi M., 2003. The Eastern Turkey Seismic Experiment: The Study of a Young Continent–

Continent Collision. *Geophysical Research Letters* 30 (24), 8038. <https://doi.org/10.1029/2003GL018912>.

Saroglu F., Emre Ö., Kus C.L., 1992. The East Anatolian Fault of Turkey. *Annales Tectonicae* 6, 125–199.

Sengör A., Görü N., Saroglu F., 1985. Strike-Slip Faulting and Related Basin Formation in Zones of Tectonic Escape: Turkey as a Case Study. In: K. Biddle, N. Christie-Blick (Eds), *Strike-Slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation*. Vol. 37. SEPM Special Publication, p. 227–264. <https://doi.org/10.2110/pec.85.37.0211>.

Sengör A.M.C., Kidd W.S.F., 1979. Post-Collisional Tectonics of the Turkish–Iranian Plateau and a Comparison with Tibet. *Tectonophysics* 55 (3–4), 361–376. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(79\)90184-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(79)90184-7).

Silva R., Franca G.S., Vilar C.S., Alcanis J.S., 2006. Nonextensive Models for Earthquakes. *Physical Review E* 73 (2), 026102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.73.026102>.

Sobolev G.A., Zavyalov A.D., 1980. On Concentration Criterion for Seismogenic Ruptures. *Doklady of the USSR Academy of Sciences* 252 (1), 69–71 (in Russian) [Соболев Г.А., Завьялов А.Д. О концентрационном критерии сейсмогенных разрывов // Доклады АН СССР. 1980. Т. 252. № 1. С. 69–71.].

Sotolongo-Costa O., Posadas A., 2004. Fragment-Asperity Interaction Model for Earthquakes. *Physical Review Letters* 92 (4), 048501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.92.048501>.

Taymaz T., Jackson J., McKenzie D.P., 1991. Active Tectonics of the North and Central Aegean Sea. *Geophysical Journal International* 106 (2), 433–490. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1991.tb03906.x>.

Telesca L., Chen C.-C., 2010. Nonextensive Analysis of Crustal Seismicity in Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Science* 10 (6), 1293–1297. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1293-2010>.

Tsallis C., 1988. Possible Generalization of Boltzmann–Gibbs Statistics. *Journal of Statistical Physics* 52, 479–487. <https://doi.org/10.1007/bf01016429>.

USGS Search Earthquake Catalog, 2023. Available from: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (Last Accessed March 01, 2023).

Vallianatos F., Michas G., Papadakis G., 2014. Non-Extensive and Natural Time Analysis of Seismicity before the Mw 6.4, October 12, 2013 Earthquake in the South West Segment of the Hellenic Arc. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 414 (15), 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2014.07.038>.

Westaway R., 1994. Present-Day Kinematics of the Middle East and Eastern Mediterranean. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 99 (B6), 12071–12090. <https://doi.org/10.1029/94JB00335>.

Westaway R., Arger J., 1996. The Gölbas Basin, Southeastern Turkey: A Complex Discontinuity in a Major Strike-Slip Fault Zone. *Journal of the Geological Society* 153 (5), 729–743. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.153.5.0729>.

Westaway R., Arger J., 2001. Kinematics of the Malatya–Ovacik Fault Zone. *Geodinamica Acta* 14 (1–3), 103–131. <https://doi.org/10.1080/09853111.2001.11432438>.

Yunga S.L., 1990. Methods and Results of Seismotectonic Deformation Studies. Nauka, Moscow, 191 p. (in Russian) [Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.].

Yunga S.L., 1997. On the Classification of Seismic Moment Tensors on the Basis of Their Isometric Mapping onto a Sphere. Doklady Earth Sciences 352 (2), 253–255 (in Russian) [Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // Доклады РАН. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255].

Yürür M.T., Chorowicz J., 1998. Recent Volcanism, Tectonics and Plate Kinematics near the Junction of the African,

Arabian and Anatolian Plates in the Eastern Mediterranean. Journal of Volcanology and Geothermal Research 85 (1–4), 1–15. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(98\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(98)00046-8).

Zavyalov A.D., 2006. Medium-Term Earthquake Forecast: Basics, Methodology, Implementation. Nauka, Moscow, 242 p. (in Russian) [Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. М.: Наука, 2006. 242 с.].

Zor E., Sandvol E., Gürbüz C., Türkelli N., Seber D., Barazangi M., 2003. The Crustal Structure of the East Anatolian Plateau (Turkey) from Receiver Functions. Geophysical Research Letters 30 (24), 8044. <https://doi.org/10.1029/2003GL018192>.