

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ТУРЦИИ 06.02.2023 г.

© 2023 г. Д. А. Симонов<sup>1</sup>, \*, В. С. Захаров<sup>1</sup>, \*\*

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет, г. Москва, Россия

\*E-mail: dsim\_0@mail.ru

\*\*E-mail: zakharov@geol.msu.ru

Поступила в редакцию 08.06.2023 г.

После доработки 16.06.2023 г.

Принята к публикации 20.06.2023 г.

Для региона юго-восточной Турции, где произошли сильные землетрясения 06.02.2023 г., проведен кинематический анализ движений плит и блоков региона на основании однородной базы данных скоростей смещения станций постоянного наблюдения ГНСС. Установлено, что вдоль Восточно-Анатолийской разломной зоны с 2008 по 2018 гг. происходило смещение Аравийской плиты относительно Анатолийской, соответствующее левому сдвигу (без нормальной компоненты) со скоростью от 1 см/год в восточной части до 0.8 см/год в западной. Вдоль разлома Чардак происходили смещения, соответствующие левому сдвигу-взбросу, со скоростью менее 0.7 см/год. Выявленная кинематика подтверждается механизмами очагов и косесеismicкими смещениями изучаемых землетрясений. Землетрясение *M7.5*, произошедшее непосредственно на разломе Чардак, не является афтершоком землетрясения *M7.8*, а представляет собой относительно независимое событие. Анализ сейсмического режима показывает, что напряжения на Восточно-Анатолийском разломе после основного события *M7.8* снимаются первой крупной широтной разломной зоной (разломом Чардак). Результаты нашего исследования позволяют предположить, что для общей кинематики плит региона определяющим, по всей вероятности, является разворот Анатолийской и Аравийской плит против часовой стрелки, связанный с раскрытием Красноморского рифта.

*Ключевые слова:* землетрясение 06.02.2023 г., Газеантеп, Турция, данные ГНСС, сейсмичность, разломы, кинематический анализ, сейсмо тектоника, геодинамика, Восточно-Анатолийский разлом, Анатолийская плита, Аравийская плита.

DOI: 10.31857/S0002333723060194, EDN: YMSNQP

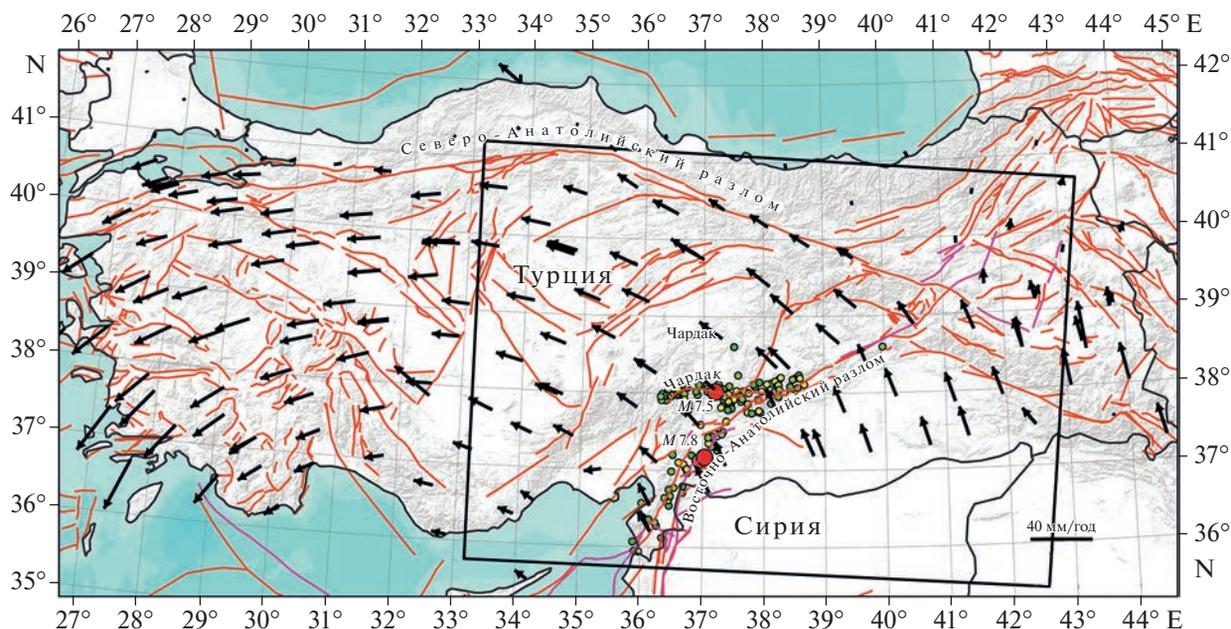
### ВВЕДЕНИЕ

06.02.2023 г. в 01:17:32 UTC на юго-востоке Турции, в Восточно-Анатолийской разломной зоне в районе г. Газеантеп произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 7.8 и координатами эпицентра 37.17 с.ш. и 37.08 в.д. [European-Mediterranean ...; National ...]. Через 9 ч (в 10:24:47 UTC) на расстоянии около 90 км на северо-восток от этого первого произошло второе сильное землетрясение с магнитудой 7.5 и координатами эпицентра 38.11 с.ш. и 37.24 в.д. (в районе разлома Чардак, рис. 1). Оба события привели к значительным разрушениям и многочисленным человеческим жертвам и сопровождаются значительным афтершоковым процессом, продолжающимся длительное время [European-Mediterranean ...; Hancılar et al., 2023; Lekkas et al., 2023; National ...]. Анализ данных землетрясений, а также связанных с ними процессов дает уни-

кальную возможность для уточнения современной геодинамики региона и механизма взаимодействия тектонических плит.

Район, в котором произошли указанные землетрясения, является тектонически активным и находится на границе Аравийской и Евразийской плит, в зоне сочленения Восточно-Анатолийского разлома с системой разломов Мертвого моря. Район характеризуется сложной структурой разломов и блоков, неоднородным напряженным состоянием и кинематикой. Следствием этого является повышенная сейсмичность, которая фиксируется как по историческим, так и по современным инструментальным данным [Duman, Emre, 2013; Duman et al., 2018; European-Mediterranean ...; National ...].

Цель работы – на основании анализа данных Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), а также сейсмического режима в районе



**Рис. 1.** Район исследований. Стрелки – скорости смещения станций постоянного наблюдения ГНСС Турции относительно Евразии по данным работы [Özdemir, Karşlıoğlu, 2019]. Представлены также эпицентры землетрясений 06.02.2023 г.  $M7.8$  и  $M7.5$  (красные кружки), сильнейшего афтершока  $M6.7$  (оранжевый кружок) и афтершоки за период 06–08.02.2023 г. по каталогу NEIC (зеленые кружки –  $4 \leq M < 5$ , желтые –  $5 \leq M \leq 6$ ). Красные линии – активные разломы по данным работ [Бачманов и др., 2017; Emre et al., 2016; Richard, Pagani, 2020]. Рамкой выделен район, представленный на рис. 2–рис. 4.

катастрофических землетрясений 06.02.2023 г. в Юго-Восточной Турции определить кинематику блоков земной коры региона, уточнить геодинамику и особенности взаимодействия Аравийской и Анатолийской плит.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

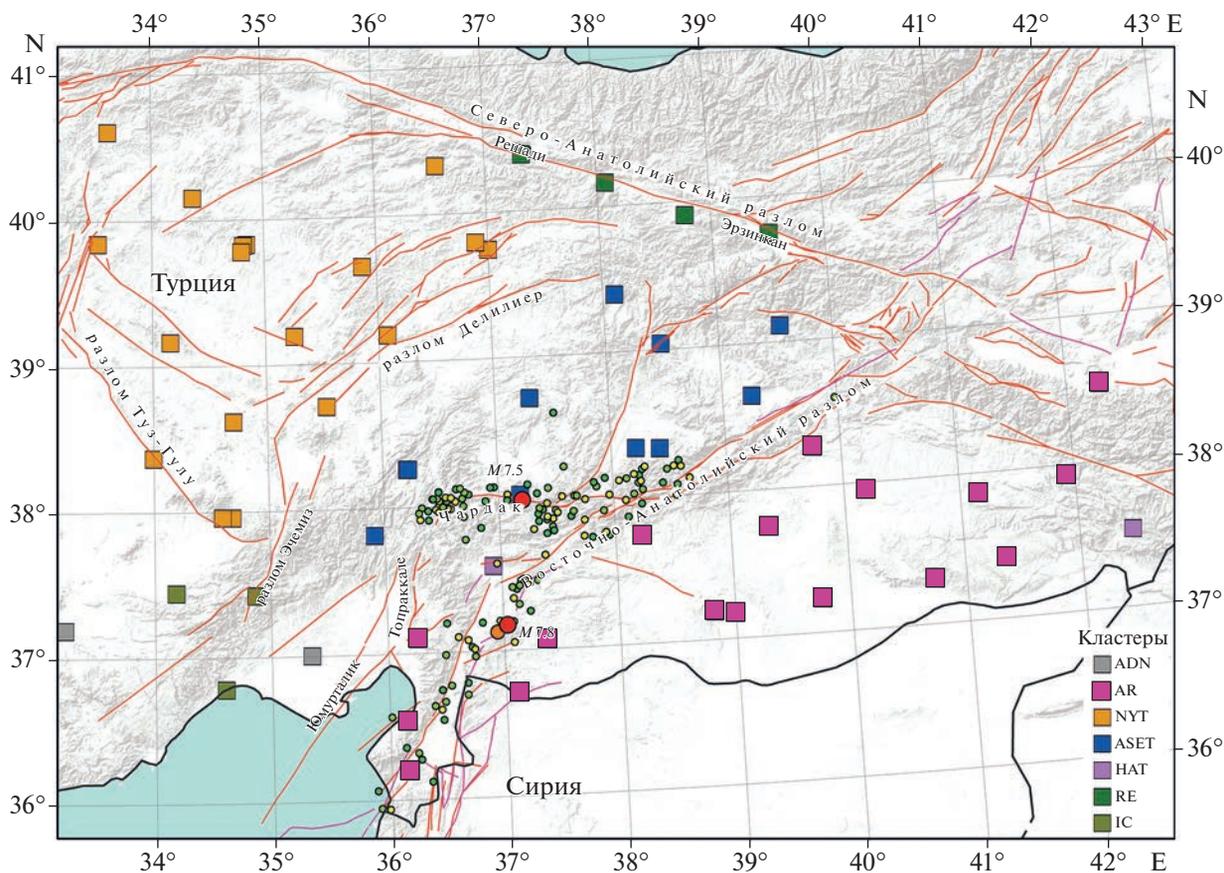
Предлагаемый в настоящей работе геодинимический и сейсмодинамический анализ проводился на основании информации о скоростях смещения опорных ГНСС станций постоянного наблюдения сети RTK Турции (CORS-TR) [Continuously ..., Özdemir, Karşlıoğlu, 2019; Özdemir, 2018], каталогов землетрясений EMSC-CSEM [European-Mediterranean ...] и NEIC USGS [National ...], параметров косейсмических смещений, размещенных на сайте EMSC-CSEM [European-Mediterranean ...], и других данных открытого доступа. Используются также базы активных разломов из различных источников [Бачманов и др., 2017; Emre et al., 2016; Richard, Pagani, 2020].

Для выделения блоков земной коры и анализа их современной кинематики в Восточной Турции нами была использована однородная база данных скоростей смещения станций постоянного наблюдения Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), опубликованных в 2019 г. [Özdemir, Karşlıoğlu, 2019]. В основном

это данные о скоростях смещений станций CORS-TR в период времени с 2008 по 2018 гг. [Continuously ...], а также данные TNPNG и MAGNET [Özdemir, 2016]. Все скорости приведены к системе координат с фиксированным положением Евразии [Özdemir, Karşlıoğlu, 2019]. Анализ проводился с применением авторских методик, описанных в работах [Захаров, Симонов, 2010; Завьялов, Захаров, 2012]. Определение деформаций внутри выделенных блоков проводилось на основании сети триангуляции, построенной по станциям CORS-TR. Сейсмический режим района рассматриваемых катастрофических землетрясений исследовался на основе детального анализа каталогов землетрясений.

### СМЕЩЕНИЯ И ДЕФОРМАЦИИ

Осредненный полюс вращения для всех пунктов ГНСС, расположенных в пределах Анатолийской плиты западнее Восточно-Анатолийского разлома, рассчитанный по методике из работы [Завьялов, Захаров, 2012], расположен в пределах Синайского полуострова и имеет координаты  $33.13^\circ$  в.д.  $30.51^\circ$  с.ш. Согласно этой оценке Анатолийская плита в целом испытывает вращение против часовой стрелки относительно Синайского п-ова со средней скоростью около  $1.8^\circ$  за млн лет, что дает скорости смещения относительно стабильной Евразии вдоль Северо-Анатолийско-



**Рис. 2.** Пункты ГНСС (квадраты), принадлежащие кинематически однородным кластерам, выделенным на основании анализа данных ГНСС [Özdemir, Karşlıoğlu, 2019] по методике авторов работы [Захаров, Симонов, 2010]. Кластеры: ADN – Адана, AR – Аравия, NYT – Невсехир–Йозгат–Токат, ASET – Адана–Сиваз–Елазиг–Тунцели, NAT – Хаттай, RE – Решади–Эрзинкан, IC – Айчел. Кружки – эпицентры землетрясений, те же, что на рис. 1.

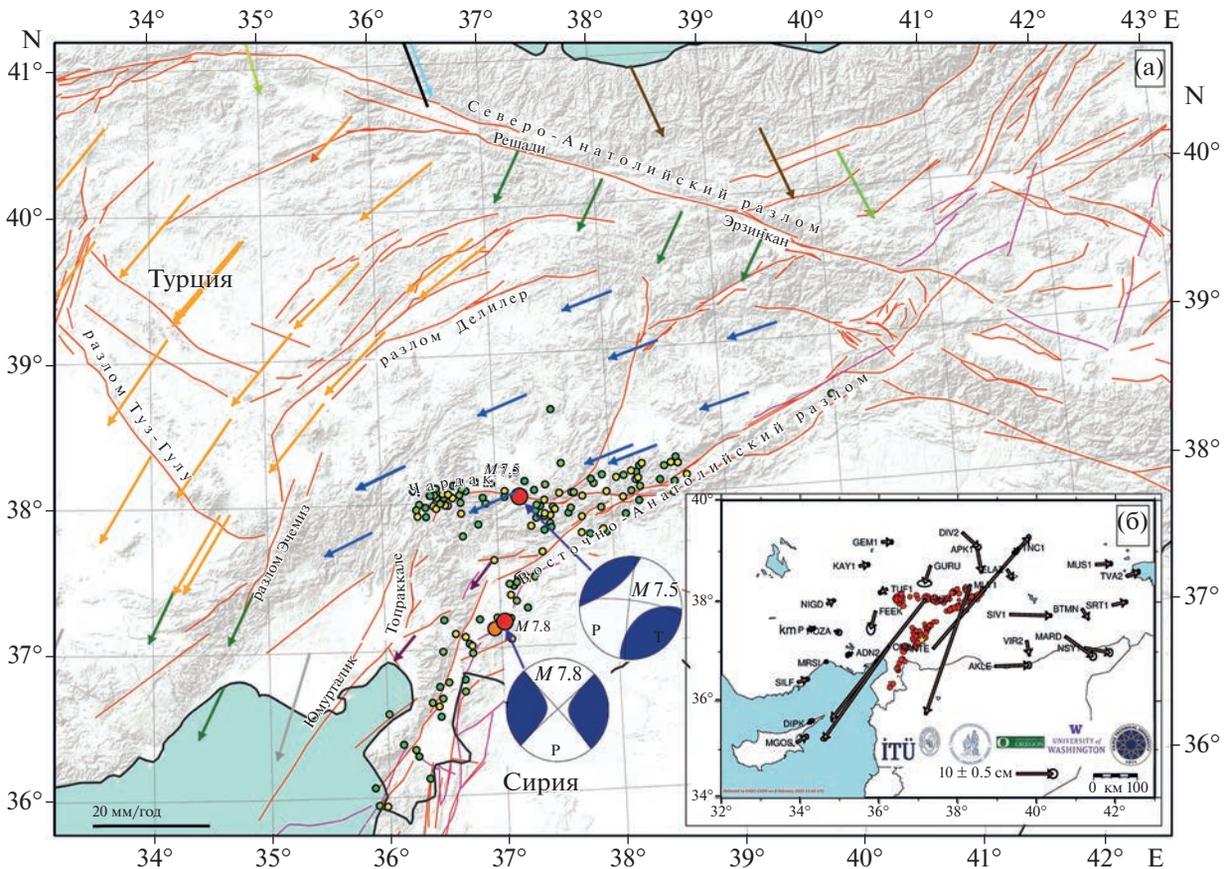
го разлома от 2 см/год в восточной части Турции до 4 см/год в западной (рис. 1). Скорости смещения станций, расположенных восточнее Восточно-Анатолийского разлома (т.е. в пределах Аравийской плиты) в целом согласуются с полем скоростей Анатолии, однако имеют несколько другой, хотя и близкий полюс вращения ( $20.38^\circ$  в.д.,  $27.52^\circ$  с.ш.). Это свидетельствует о том, что кинематика Аравийской плиты несколько отличается от кинематики Анатолийской.

На основании проведенного нами анализа данных ГНСС по оригинальной методике авторов [Захаров, Симонов, 2010] в восточной Турции было выделено шесть кинематически однородных кластеров. Допуски при кластеризации, задание которых является элементом методики, были в данном случае приняты  $10^\circ$  в отклонении направления вектора смещения и 20% в отклонении величины угловой скорости смещения. Такие большие допуски были заданы с целью объединения мелких кластеров, незначительно отличающихся по своей кинематике, в более крупные для упрощения интерпретации данных и обобщения.

Сопоставление с тектонической структурой показывает, что границы выделенных нами кинематически однородных кластеров могут быть проведены по известным активным разломам, что позволяет интерпретировать эти кластеры как относительно жесткие блоки земной коры (рис. 2). Названия кластеров (блоков) даются нами условно на основании региональных топонимов.

Юго-восточнее Восточно-Анатолийского разлома при выбранных допусках кластеризации выделяется единый кластер AR, который можно уверенно ассоциировать с Аравийской плитой, граничащей с Анатолийской плитой по Восточно-Анатолийскому разлому.

Непосредственно на северо-западе от Восточно-Анатолийского разлома выделяются два кластера с несколько различающейся кинематикой. Один, достаточно крупный, Адана–Сиваз–Елазиг–Тунцели (ASET), который может быть ассоциирован с одноименным блоком, ограниченным Восточно-Анатолийским разломом, разломной системой Эчемиз–Делилер и разломной системой Чардак. Другой, небольшой по размерам и коли-



**Рис. 3.** Относительные движения: (а) — скорости движений пунктов ГНСС (стрелки) относительно Аравии по результатам анализа по методике авторов работы [Захаров, Симонов, 2010]. Кружки — эпицентры землетрясений, те же, что на рис. 1. Представлены также механизмы очагов землетрясений  $M7.8$  и  $M7.5$  по данным NEIC; (б) — косейсмические смещения станций CORS-TR по данным EMSC-CSEM [European-Mediterranean ...].

честву входящих в него станций ГНСС кластер Хатай (НАТ), который можно ассоциировать с одноименным блоком, расположенным между Восточно-Анатолийским разломом и разломами Юмурталики, Топраккале и Чардак.

Северо-западнее разломной системы Эчемиз–Делилер выделяется крупный Центрально-Анатолийский кластер, названный нами в пределах рассматриваемой территории Невсехир–Йозгат–Токаат (НУТ). Южнее этого кластера выделяется сходный с ним по кинематике кластер Айчел (ИС), отделенный южными секторами разлома Туз–Гулу.

Вдоль Северо-Анатолийского разлома выделяется кластер (RE) из вытянутых в цепочку станций между его сегментами Решади и Эрзинкан. Выделение этого кластера может свидетельствовать о том, что данный участок Северо-Анатолийского разлома находится в состоянии транс-прессии и заблокирован. То есть смещения здесь реализуются не по основному сместителю разлома, а в него вовлечены прилегающие к разлому области. При этом вдоль основного разлома мо-

гут накапливаться напряжения. Об этом свидетельствует вытянутая вдоль разлома на этом участке зона преимущественно деформаций сжатия, а также пониженная сейсмическая активность по каталогу NEIC за весь период наблюдения.

По методике из работы [Захаров, Симонов, 2010] были рассчитаны движения выделенных нами блоков земной коры относительно стабильной Аравийской плиты (рис. 3а).

Блок ASET смещается относительно Аравийской плиты (AR) вдоль Восточно-Анатолийского разлома на юго-запад со скоростью 0.9–1 см/год. Блок НАТ смещается в тех же румбах со скоростью приблизительно 0.6–0.8 см/год. Таким образом, Восточно-Анатолийский разлом в период времени с 2008 по 2018 гг. проявлял себя как левый сдвиг без нормальной компоненты со скоростью смещения около 1 см/год северо-восточнее его сочленения с разломной системой Чардак, и как левый сдвиг со скоростью смещения около 0.6 см/год юго-западнее этого сочленения. Это хорошо согласуется с результатами, получен-

ными другими исследователями, например, авторами работы [Aktug et al., 2016].

Блок NYT смещается относительно Аравийской плиты (AR) на юго-запад со скоростью около 1.7 см/год, относительно блока ASET вдоль левого сдвига Делилер со скоростью около 0.7 см/год со слабой выраженной взбросовой компонентой, что следует из направления и относительных скоростей смещения блоков, и вдоль левого сдвига Эчемиз со скоростью около 0.9–1 см/год без выраженной взбросовой компоненты.

Блок НАТ, как уже было указано выше, смещается на юго-запад по отношению к AR, и на восток по отношению к ASET вдоль разлома Чардак. Скорость левого сдвига вдоль разлома составляет около 0.5 см/год.

Скорость смещения блока ASET относительно заблокированного участка Северо-Анатолийского разлома (RE) на запад составляет около 0.7 см/год со взбросовой компонентой около 0.3 см/год.

Таким образом, на основании проведенного кинематического анализа выявлено, что за период наблюдения (с 2008 по 2018 гг.) вдоль Восточно-Анатолийской разломной зоны происходило смещение Аравийской плиты относительно Анатолийской, соответствующее левому сдвигу (без нормальной компоненты) со скоростью от 1 см/год в восточной части до 0.8 см/год в западной. Вдоль разлома Чардак происходили смещения, соответствующие левому сдвигу-взбросу, со скоростью менее 0.7 см/год. Выявленная кинематика хорошо коррелирует с механизмами очагов основного события  $M7.8$  и события на разломе Чардак  $M7.5$  (рис. 3а).

Кроме того, данные о косейсмических смещениях станций CORS-TR, опубликованные EMSC-CSEM [European-Mediterranean ...] позволяют говорить о левосдвиговом смещении со значительной амплитудой непосредственно вдоль Восточно-Анатолийской разломной зоны при движении Аравийской плиты относительно Анатолийской на восток, и даже на юго-восток (рис. 3б). Направления косейсмических смещений вдоль Восточно-Анатолийского разлома и вдоль разлома Чардак совпадают с направлениями смещений, выявленными за период длительных наблюдений ГНСС с 2008 по 2018 гг.

Выделение кинематически однородных кластеров в поле скоростей смещения пунктов ГНСС, и, следовательно, относительно жестких блоков земной коры было проведено с большими допусками, что предполагает возможное наличие деформаций внутри выделенных блоков. Для их выявления было определено поле скоростей относительных линейных деформаций на основании сети триангуляции, построенной по положениям станций CORS-TR. Скорость линейной деформации рассчитывалась через разницу длины

ребер сетей триангуляции, построенных для исходного положения станций ГНСС и их положения с учетом скоростей смещения этих станций в восточном и северном направлении. Интерполяция производилась методом естественного окружения, результаты представлены на рис. 4.

Отметим, что деформации вдоль Северо-Анатолийского и Восточно-Анатолийского разломов распределялись в виде последовательных зон относительного сжатия и растяжения, что возможно отражает механизм реализации прерывистого (импульсного) смещения по разломам. При этом вдоль Восточно-Анатолийского разлома области относительного сжатия и растяжения чередуются почти периодически через 40–60 км, в то время как вдоль Северо-Анатолийского разлома области относительного сжатия существенно протяженнее областей относительного растяжения. В частности, описанный выше кластер RE как раз расположен в такой протяженной области сжатия. По нашему мнению, такая конфигурация областей сжатия и растяжения вдоль Северо-Анатолийского разлома может свидетельствовать о том, что он находится в обстановке дополнительного сжатия, большего, чем в пределах Восточно-Анатолийской зоны. Интересно отметить, что в полученном поле скоростей деформации как основное событие  $M7.8$ , так и событие  $M7.5$  на разломе Чардак, произошли в области перехода от относительного сжатия к относительному растяжению (рис. 4).

## СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

Район исследований характеризуется повышенной сейсмичностью [Duman, Emre, 2013; Duman et al., 2018]. Данные по исторической сейсмичности за последние 2000 лет свидетельствуют, что здесь было более 25 землетрясений, магнитуда которых оценивается больше 6.0, однако по историческим данным трудно достоверно выявить интервалы повторяемости или динамику миграции сильных землетрясений. За период инструментальных наблюдений (с начала XX в.) сейсмическую активность в районе можно охарактеризовать как значительную: по каталогу NEIC здесь зафиксировано около 1000 землетрясений с  $M \geq 4$ . Многие землетрясения сопровождались значительными подвижками, фиксируемыми как палеосейсмологическими, так и инструментальными методами.

Анализ сейсмической активности в районе, предшествующей и последующей рассматриваемым сильным землетрясениям, проводился нами как по каталогу NEIC [National ...], в котором для данного региона представлены события с  $M \geq 4$ , так и главным образом по более детальному европейскому каталогу EMSC [European-Mediterranean ...], в котором представлены события с  $M \geq 2$ .

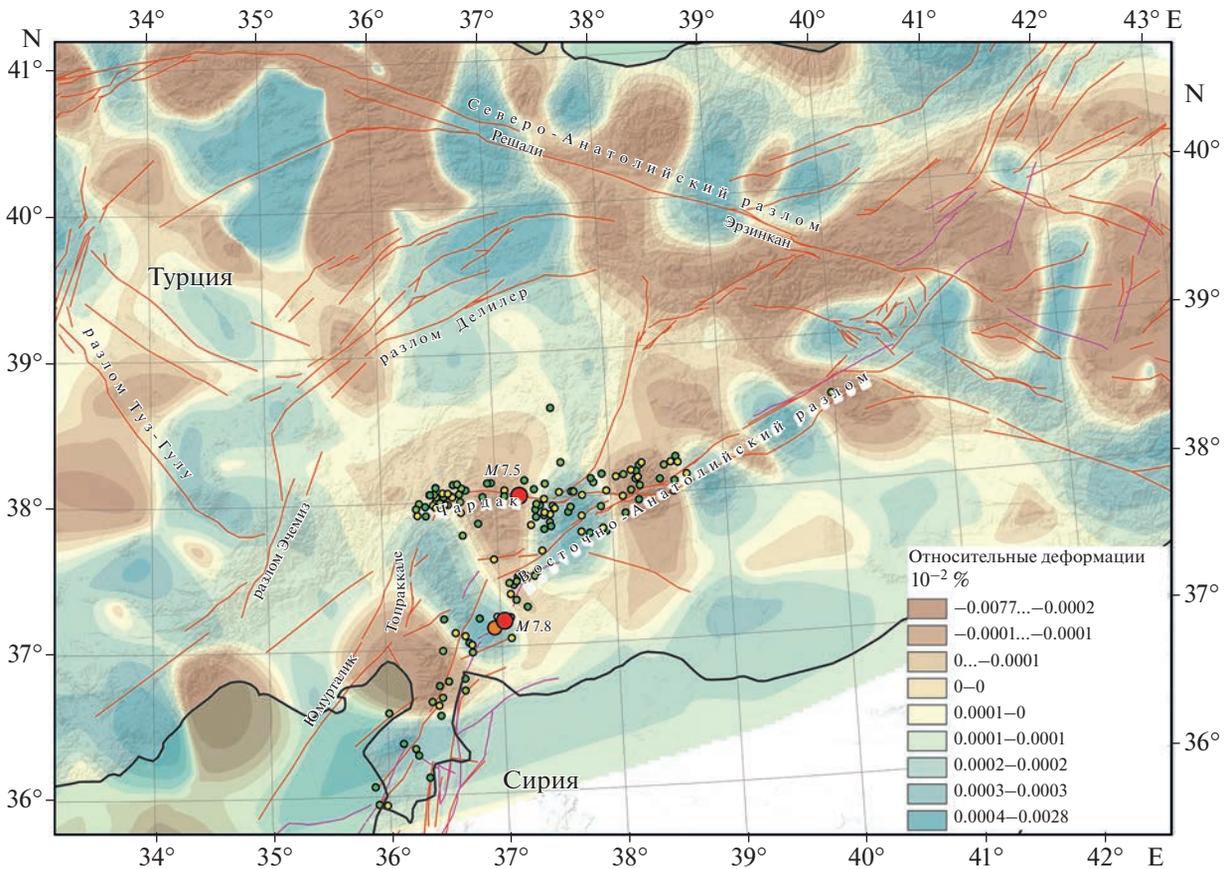


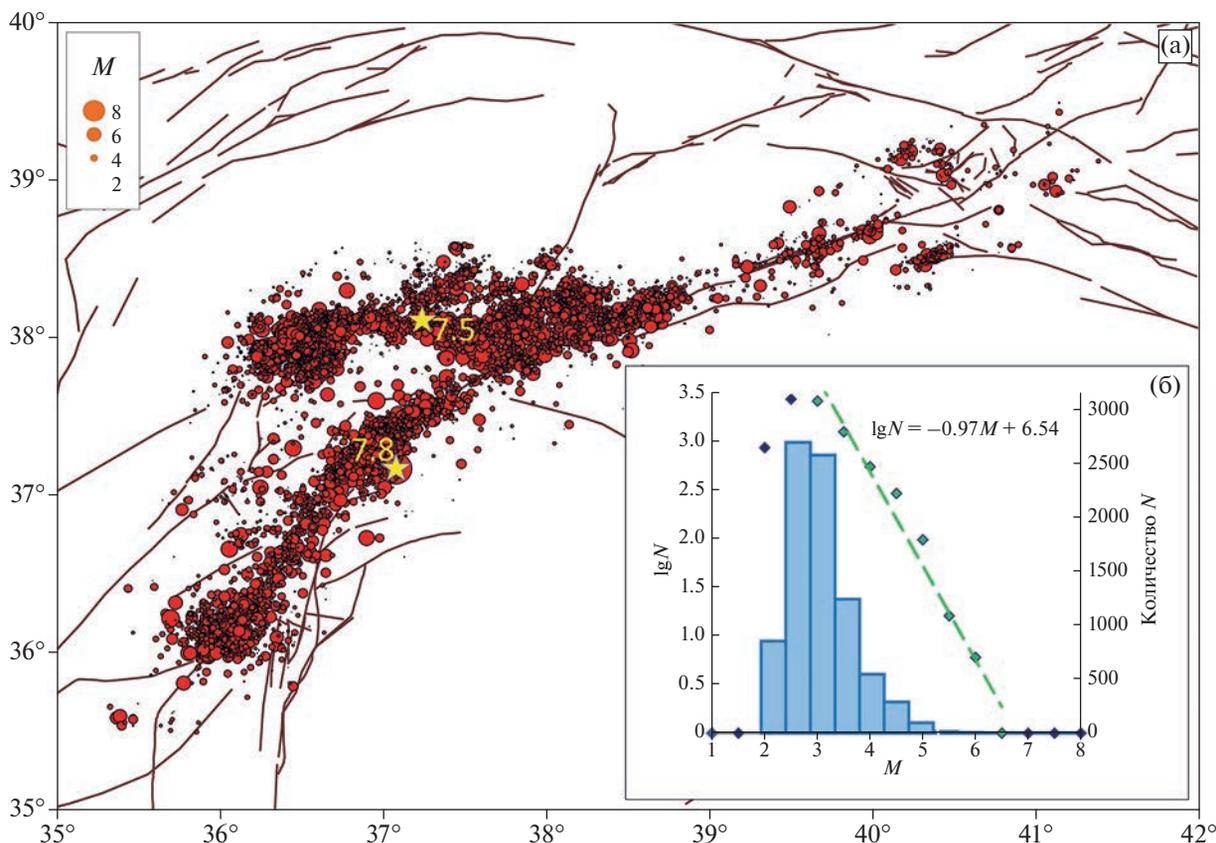
Рис. 4. Относительные деформации, рассчитанные на основании данных CORS-TR (подробности в тексте). Отрицательные значения – сжатие, положительные – растяжение. Кружки – эпицентры землетрясений, те же, что на рис. 1.

Из каталогов нами был произведен отбор анализируемых событий в полосе 60 км от основных разломов, с которыми они связаны – Восточно-Анатолийского и Чардак. Выбор такой полосы обусловлен данными о распределении интенсивности и PGA (*peak ground acceleration* – максимальное ускорение колебаний грунта), связанных с основным событием  $M7.8$  – это примерно соответствует расстоянию, на котором PGA для сильнейшего из событий ( $M7.8$ ) спадает до уровня  $0.1\text{--}0.2\text{g}$  [European-Mediterranean ...; Lekkas et al., 2023; National ...]. Аналогичная величина для уровня PGA  $0.1\text{g}$  получается также при помощи оценки, проведенной нами на основании регрессионных соотношений, связывающих PGA, магнитуду и расстояние до землетрясения, комбинация которых приведена в работе [Захаров и др., 2022]. Пространственное распределение отобранных для анализа эпицентров землетрясений за период январь 2022–апрель 2023 гг. представлено на рис. 5а.

Кроме отбора по положению эпицентров нами проводился отбор событий для анализа на основании статистики землетрясений. На рис. 5б представлено распределение по магнитуде собы-

тий афтершоковой последовательности исследуемых сильных землетрясений по данным каталога EMSC за период 06.02–30.04.2023 г., а также график повторяемости, который аппроксимирует спадающую ветвь распределения, выражающий закон Гутенберга–Рихтера (параметр  $b = 0.97 \pm 0.07$ ). Анализ графика повторяемости дает возможность предварительно оценить представительную магнитуду  $M_c$  используемого каталога EMSC для данного района как 3–3.5. Это позволяет нам разделить землетрясения по магнитуде и дальнейший анализ проводить только для событий с  $M \geq 3.5$ . Кроме того, в настоящем анализе сейсмического процесса при отнесении к форшокам и афтершокам мы предварительно ограничиваемся описанным выше пространственным положением их эпицентров в очаговых зонах обоих катастрофических землетрясений. Более обоснованное и детальное определение как представительной магнитуды, так и форшоков и афтершоков, а также их анализ требует отдельного исследования.

Несмотря на то, что, как сказано выше, данный район является сейсмически активным, в последнее время сейсмичность тут была не очень интенсивная (рис. 6). Так, на протяжении года,



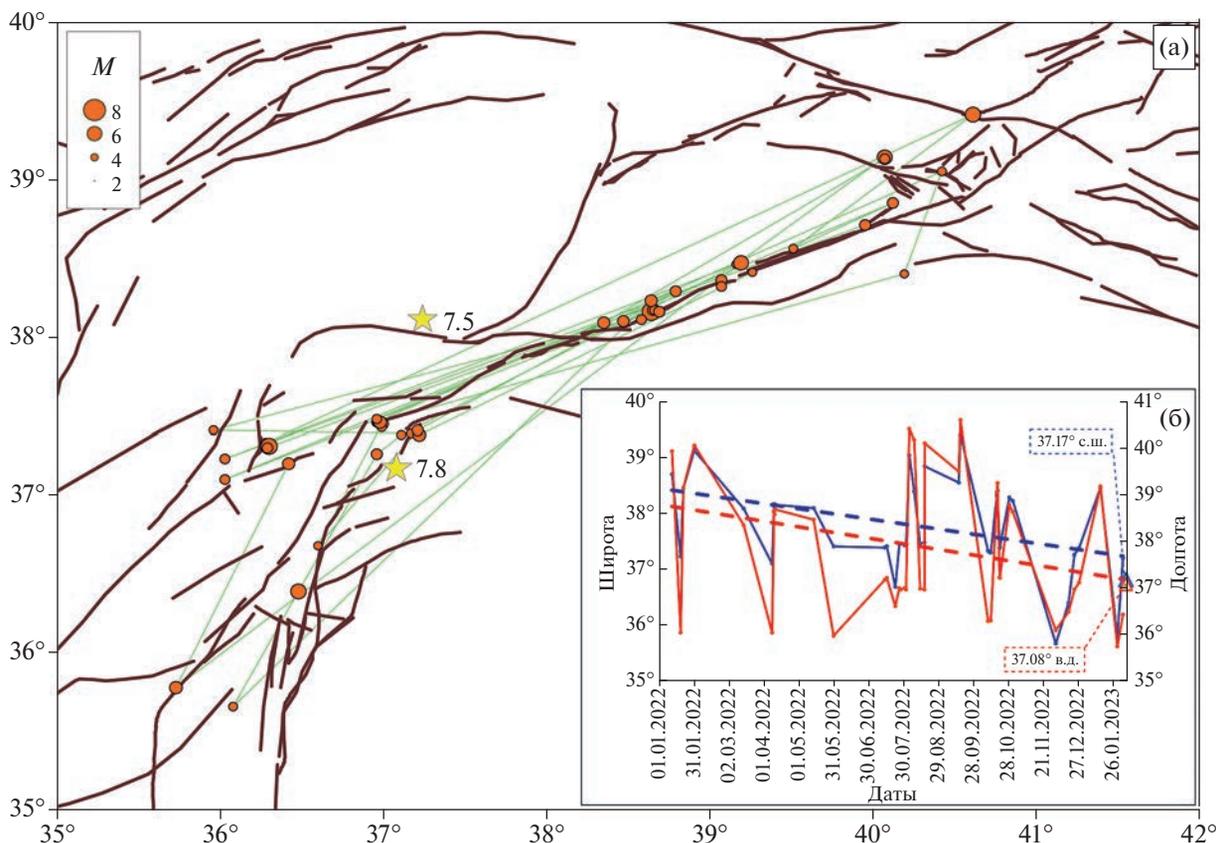
**Рис. 5.** Сейсмичность в районе Восточно-Анатолийского разлома по каталогу EMSC за период 01.2022–04.2023 г.: (а) – положение эпицентров землетрясений (красные кружки); желтые звезды – эпицентры землетрясений 06.02.2023 г.  $M7.8$  и  $M7.5$ , коричневые линии – активные разломы; (б) – распределение количества  $N$  афтершоков землетрясений 06.02.2023 г. по магнитуде  $M$  (за период 06.02–30.04.2023 г.) в линейном (гистограмма) и логарифмическом (остальные графики) вертикальном масштабе. Штриховая зеленая линия – график повторяемости для диапазона  $M \geq 3$ , представлен также закон Гутенберга–Рихтера (параметр  $b = 0.97$ ).

предшествующего сильным землетрясениям 06.02.2023 г., в каталоге EMSC зафиксировано только 45 событий с  $M$  3.5–5.3 (рис. 6а), из них 21 – с  $M \geq 4$ . Можно отметить, что сейсмическая активность в этот промежуток времени развивается преимущественно вдоль простирания Восточно-Анатолийского разлома севернее будущего основного события  $M7.8$ , а события, происходившие южнее него, в зоне сочленения Восточно-Анатолийского разлома с разломом Мертвого моря носят преимущественно случайный, выпадающий из основной последовательности событий, характер. При этом анализ временной последовательности (рис. 6б) дает возможность на фоне общей, достаточно хаотической динамики выявить определенный тренд миграции положения эпицентров. Статистический анализ показывает, что, несмотря на низкие коэффициенты корреляции (0.41 для широты и 0.31 для долготы), выбранная регрессионная модель является достоверной на уровне 95% по критерию Фишера. Тренд этот направлен вдоль общего простирания Восточно-

Анатолийской разломной зоны с СВ на ЮЗ, т.е. в направлении области происшедшего сильного землетрясения  $M7.8$ . Аналогичный тренд выявлен нами и по каталогу NEIC для событий с  $M \geq 4$ .

Анализ афтершоковой последовательности по каталогу EMSC показывает, что сразу после события  $M7.8$  и в течение 9 часов вплоть до сильного события  $M7.5$ , которое произошло на разломе Чардак, эпицентры афтершоков (123 события с  $M \geq 3.5$ , рис. 7а) мигрировали исключительно вдоль простирания Восточно-Анатолийской разломной зоны, а в районе разлома Чардак сейсмических событий в этот период практически не было.

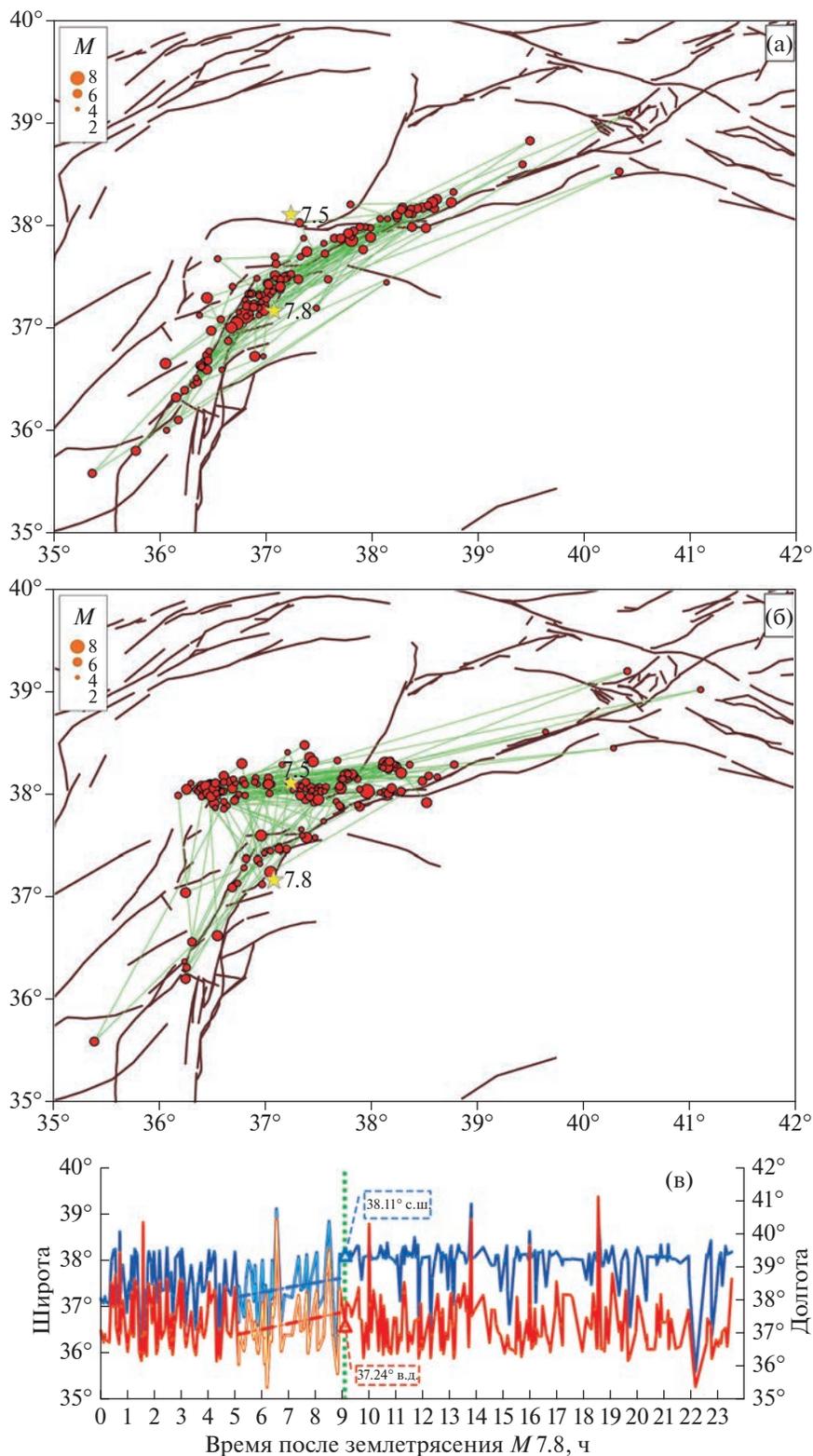
Интересно отметить, что, если в форшоковой последовательности землетрясения в зоне сочленения Восточно-Анатолийского разлома с разломом Мертвого моря южнее основного события  $M7.8$  выглядят скорее случайными, то при проявлении афтершоковой активности землетрясения в этой области входят в доминирующую последовательность. При этом если в первые 5 часов после события  $M7.8$  миграция эпицентров афтер-



**Рис. 6.** Землетрясения в районе Восточно-Анатолийского разлома, предшествующие сильным землетрясениям 06.02.2023 г.: (а) – положение эпицентров землетрясений (оранжевые кружки) с  $M \geq 3.5$  по каталогу EMSC за период 11.01.2022–05.02.2023 гг., зеленые линии соединяют эпицентры последовательных событий; (б) – временные последовательности для широты (синяя линия) и долготы (красная линия) эпицентров землетрясений и выделенные тренды (штриховые линии). Треугольниками показаны координаты землетрясения  $M7.8$ : синий – широта ( $37.17^\circ$  с.ш.), красный – долгота ( $37.08^\circ$  в.д.).

шоков в целом хаотична, то в последние 4 часа перед событием  $M7.5$  удается на фоне хаотической динамики выделить определенный тренд (рис. 7в). Статистический анализ показывает, что коэффициенты корреляции при выделении этого тренда еще меньше, чем для форшоковой последовательности (0.16 для широтного и 0.21 для долготного смещений), однако все же выбранная регрессионная модель является достоверной на уровне 68% по критерию Фишера. Тренд этот направлен вдоль общего простирания Восточно-Анатолийской разломной зоны с ЮЗ на СВ, т.е. в направлении, обратном выделенному нами тренду форшоков. Анализ каталога NEIC за этот же промежуток времени позволяет для событий с  $M \geq 4$  выделить два диапазона, в которых можно выделить тренд смещения очагов афтершоков такого же направления (с ЮЗ на СВ). Это первые 3 ч после главного события  $M7.8$  и последние 4 ч перед событием  $M7.5$  (т.е. аналогично выделенному по каталогу EMSC).

Землетрясение с  $M7.5$ , произошедшее на разломе Чардак, имеющем простирание 3–В, не предвлялось сколько-нибудь заметной сейсмичностью по этому разлому, но оно резко изменяет динамику афтершоков (рис. 7б, 7в). Развитие сейсмичности дальше на СВ по Восточно-Анатолийской разломной зоне практически прекращается. Сразу после землетрясения  $M7.5$  наблюдается большое количество его афтершоков вдоль разлома Чардак: за 15 часов после него по данным каталога EMSC из 164 событий с  $M \geq 3.5$  более 130 располагались именно вдоль зоны этого разлома, больше тяготея к его концам, что хорошо видно как на карте эпицентров (рис. 7б), так и на временных последовательностях (рис. 7в). Преобладание сейсмичности в зоне разлома Чардак продолжалось примерно 15 часов после землетрясения, произошедшего на нем (что соответствует 1 сут после землетрясения  $M7.8$ ) (рис. 7б). Таким образом, можно говорить о фактическом переносе сейсмической активности с Восточно-Анатолийской разломной зоны на разлом Чардак в этот



**Рис. 7.** Землетрясения с  $M \geq 3.5$  (по каталогу EMSC), произошедшие в течение 1 суток после землетрясения  $M7.8$  06.02.2023 г.: (а) – положение эпицентров землетрясений, произошедших в течение 9 часов после события  $M7.8$  (до землетрясения  $M7.5$ ); (б) – положение эпицентров землетрясений произошедших в течение 15 часов после события  $M7.5$ . Зеленые линии соединяют эпицентры последовательных событий; (в) – временные последовательности для широты (синяя линия) и долготы (красная линия) эпицентров землетрясений. Показаны также выделенные тренды (штриховые линии) за 4 часа до события  $M7.5$ . Зеленая пунктирная линия – землетрясение  $M7.5$ , синий треугольник – его широта ( $38.11^\circ$  с.ш.), красный – долгота ( $37.24^\circ$  в.д.)

период, это видно также на рис. 7в, где после события  $M7.5$  большинство землетрясений имеет широту, близкую к  $38^\circ$ , что соответствует этому разлому. Однако затем активность обоих разломов (Восточно-Анатолийского и Чардак) примерно выравнивается (рис. 5а). Аналогичная динамика выявляется и при анализе событий с  $M \geq 4$  по каталогу NEIC.

Далее за анализируемый промежуток времени, кроме наложенных афтершоков обоих сильных событий 06.02.2023 г., выявляется некоторая сейсмичность вдоль Восточно-Анатолийской зоны дальше в СВ направлении (рис. 5а). Однако количество этих сейсмических событий значительно меньше, чем в районе землетрясений  $M7.8$  и  $M7.5$ , что может свидетельствовать о том, что напряжения на Восточно-Анатолийском разломе снимаются первой крупной широтной разломной зоной (разломом Чардак). На северо-восток их распространение практически ограничено областью смыкания Восточно- и Северо-Анатолийского разломов. Таким образом, сколько-нибудь заметной миграции сейсмичности дальше на СВ не наблюдается.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ кинематики блоков и скоростей деформаций земной коры показывает, что основным механизмом смещения вдоль Восточно-Анатолийского разлома является горизонтальный левый сдвиг без выраженной нормальной компоненты. Такая кинематика выявляется как на относительно длительных интервалах времени (10 лет) на основании анализа данных ГНСС, так и для мгновенных смещений в результате крупных сейсмических событий по механизму очагов. Как уже указывалось выше, осредненный полюс вращения для всех пунктов ГНСС [Özdemir, Karşlioglu, 2019], расположенных в пределах Анатолийской плиты, находится на Синайском п-ове, а сама плита в целом испытывает вращение против часовой стрелки относительно него со скоростью  $1.8^\circ$  за млн лет. При этом осредненный полюс вращения для всех пунктов ГНСС [Özdemir, Karşlioglu, 2019; Alchalbi et al., 2010], расположенных в пределах Аравийской плиты, находится в восточной части Ливии и имеет координаты  $20.38^\circ$  в.д.,  $27.52^\circ$  с.ш., т.е. отстоит от полюса Анатолийской плиты на расстоянии порядка 1000 км на запад. Согласно этой оценке, Аравийская плита испытывает вращение против часовой стрелки со скоростью  $0.42^\circ$  за млн лет, что дает линейные скорости смещения пунктов ГНСС от 2 см/год в восточной части Турции, южнее Восточно-Анатолийского разлома. Эти скорости очень близки к линейным скоростям смещения пунктов ГНСС в восточной части Анатолийской плиты. Все оценки приводятся в

координатной системе со стабильной Евразией. Близкое расположение полюса вращения Аравии к самой этой плите свидетельствует о том, что основной причиной ее смещения является вращение, вызванное раскрытием Красноморского рифта. В то же время при таком положении полюса вращения весьма трудно объяснить поступательное линейное движение плиты на север. Вращение Анатолийской плиты против часовой стрелки относительно Синайского п-ва хорошо согласуется с описанной выше кинематикой Аравийской плиты, однако несколько отличается от нее. Это отличие и вызывает левосдвиговое смещение по Восточно-Анатолийскому разлому. Предлагаемая нами схема взаимодействия этих плит представлена на рис. 8. Таким образом, по нашему мнению, наиболее значимым для кинематики всего региона является именно вращение как Аравийской, так и Анатолийской плит, связанное с раскрытием рифта Красного моря.

Данная кинематическая модель подтверждается и сейсмической активностью, непосредственно связанной с событием  $M7.8$  в районе г. Газеантеп. Имеющийся слабый тренд форшоковой активности вдоль простирающегося Восточно-Анатолийского разломной зоны в ЮЗ направлении (рис. 6б) может свидетельствовать о накапливающихся напряжениях. Эти напряжения затем были сняты основным событием, которое инициировало подвижку вдоль Восточно-Анатолийского разлома и развитие в некоторый период времени афтершоковой активности вдоль него в обратном (СВ) направлении (рис. 7в). Такая ситуация вполне соответствует импульсному характеру развития Восточно-Анатолийского разлома, о котором свидетельствует также и распределение вдоль него поля скоростей деформации за период с 2008 по 2018 гг. в виде последовательных зон относительного сжатия и растяжения (рис. 4). Важно отметить, что афтершоки, имеющие СВ тренд в своем развитии, распределялись в основном в области относительного растяжения между двумя областями относительного сжатия. При такой динамике афтершоков и выявленной в данном исследовании кинематике плит и блоков земной коры достаточно закономерным выглядит то обстоятельство, что развитие смещений по Восточно-Анатолийскому разлому было остановлено первым относительно крупным субширотным разрывом, подходящим к основной разломной зоне, т.е. разломом Чардак, на который и переместилась сейсмическая активность. Важно отметить, что разлом Чардак сопрягается с Восточно-Анатолийским разломом в области относительного сжатия. То есть развитие основной разломной зоны вызвало подвижки по разлому Чардак и инициировало следующее крупное землетрясение  $M7.5$ , расположенное примерно в его центральной части. Таким образом, землетрясение  $M7.5$

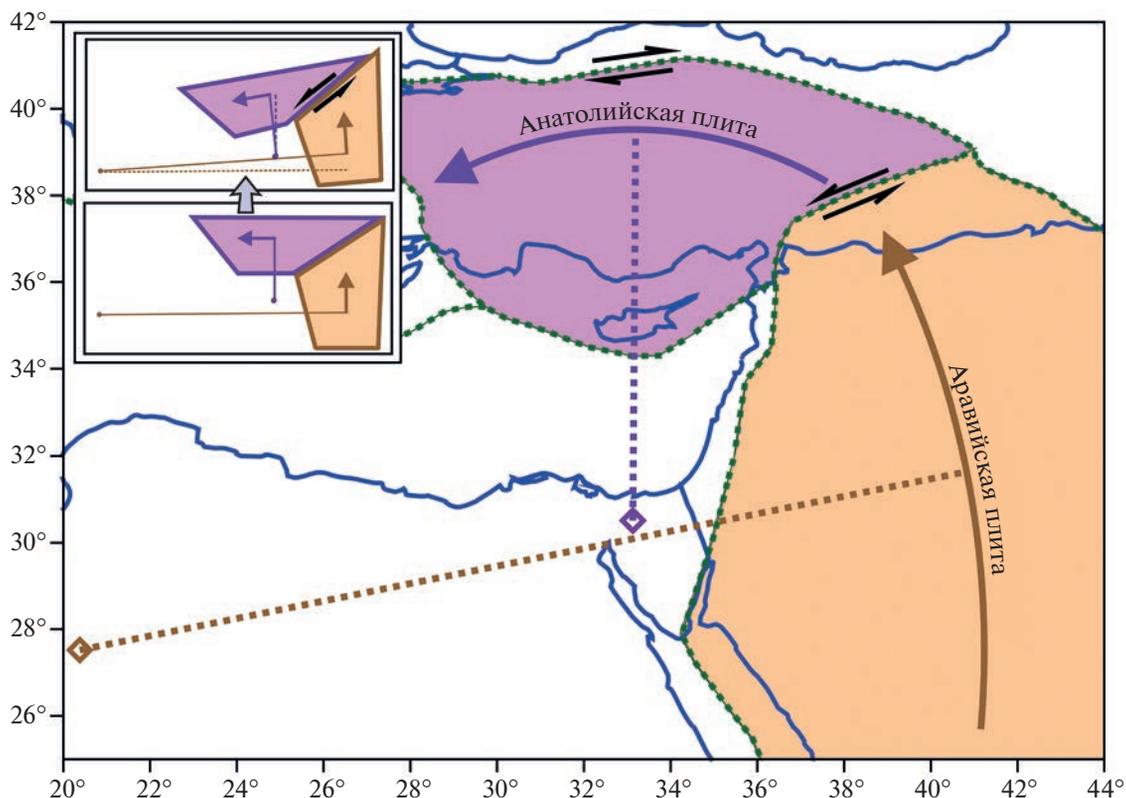


Рис. 8. Схема взаимодействия Аравийской и Анатолийской плит. На врезке — упрощенная схема, поясняющая левосдвиговую кинематику Восточно-Анатолийского разлома. Зеленые линии — границы плит по работе [Bird, 2003].

скорее всего не является афтершоком землетрясения  $M7.8$ , а представляет собой относительно независимое событие со своей афтершоковой последовательностью (обусловленное при этом, как и землетрясение  $M7.8$ , общей сейсмодинамикой региона). Последующая афтершоковая активность была связана в большей степени уже с развитием разлома Чардак, причем отмеченное тяготение афтершоков к его концам может свидетельствовать о его росте по простиранию. Некоторое время землетрясений северо-восточнее разлома Чардак на Восточно-Анатолийском разломе практически не происходило, что, скорее всего, связано с тем, что большая часть напряжений была снята, и наступила фаза релаксации. Появление сейсмической активности в этой зоне Восточно-Анатолийского разлома может свидетельствовать о постепенном возвращении к фоновому сейсмическому режиму региона.

### ВЫВОДЫ

На основании проведенного кинематического анализа выявлено, что вдоль Восточно-Анатолийской разломной зоны с 2008 по 2018 гг. происходило относительное смещение Аравийской и

Анатолийской плит, соответствующее левому сдвигу (без нормальной компоненты) со скоростью от 1 см/год в восточной части до 0.8 см/год в западной. Причина такой кинематики состоит в том, что параметры вращения Анатолийской и Аравийской плит против часовой стрелки хотя и близки, но имеют некоторые различия. Вдоль разлома Чардак происходили смещения, соответствующие левому сдвигу-взбросу, со скоростью менее 0.7 см/год. Выявленная кинематика полностью подтверждается реализованными механизмами очагов землетрясений  $M7.8$  и  $M7.5$ .

На протяжении 1 года до сильных землетрясений 06.02.2023 г. выявлен определенный тренд в положении эпицентров землетрясений (форшоков) вдоль общего простирания Восточно-Анатолийской разломной зоны с СВ на ЮЗ, т.е. в направлении области происшедшего первого сильного землетрясения с  $M7.8$ . За 4 ч перед событием  $M7.5$  также выделяется некоторый тренд вдоль общего простирания Восточно-Анатолийской разломной зоны с ЮЗ на СВ, т.е. в направлении, обратном выделенному нами тренду форшоков (к разлому Чардак). Это вполне соответствует им-

пульсному характеру развития Восточно-Анатолийского разлома, о котором свидетельствует также и распределение вдоль него поля скоростей деформации.

Землетрясение *M7.5*, произошедшее непосредственно на разломе Чардак, не является афтершоком землетрясения *M7.8*, а представляет собой относительно независимое событие, спровоцированное перераспределением напряжений после основного события и обусловленное общей сейсמודинамикой региона.

После начального этапа развития афтершоков основного землетрясения *M7.8* происходит перенос сейсмической активности с Восточно-Анатолийского разлома на разлом Чардак, и далее на СВ по Восточно-Анатолийскому разлому практически не развивается. Это может свидетельствовать о том, что напряжения на Восточно-Анатолийской зоне снимаются первой крупной широтной разломной зоной, т.е. разломом Чардак.

Результаты нашего исследования свидетельствуют, что для общей кинематики плит региона определяющим, по всей вероятности, является разворот Анатолийской и Аравийской плит против часовой стрелки, связанный с раскрытием Красноморского рифта.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122022700010-3).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г.* База данных активных разломов Евразии // Геодинамика и тектонофизика. 2017. № 8(4). С. 711–736. <https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0314>
- Завьялов С.П., Захаров В.С.* Блоковая структура земной коры по данным GPS. Геологическая среда, минерагенические и сейсмотектонические процессы. Материалы XVIII международной научно-практической конференции 24–29 сентября 2012 г. Воронеж: Научная книга. 2012. С. 126–130.
- Захаров В.С., Симонов Д.А.* Анализ современных дискретных движений блоков земной коры геодинамически активных областей по данным GPS // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2010. № 3. С. 25–31.
- Захаров В.С., Симонов Д.А., Контев А.И.* Количественная оценка потенциальных сейсмогенных оползневых смещений (на примере Сочи-Краснополянского района и Горного Алтая) // Динамическая геология. Электронный научно-образовательный журнал. 2022. № 1. С. 34–58. [http://www.geodisaster.ru/uploads/images/Dynamic/Журнал2022\\_1.pdf](http://www.geodisaster.ru/uploads/images/Dynamic/Журнал2022_1.pdf) (дата обращения 30.05.2023).
- Aktug B., Ozener H., Dogru A. et al.* Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault System using an improved GPS velocity field // J. Geodyn. 2016. V. 94–95. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.01.001>
- Alchalbi A., Daoud M., Gomez F. et al.* Crustal deformation in northwestern Arabia from GPS measurements in Syria: Slow slip rate along the northern Dead Sea Fault // Geoph. J. International. 2010. V. 180. №1. P. 125–135. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04431>
- Bird P.* An updated digital model of plate boundaries // Geochem., Geophys., Geosyst. 2003. V. 4. № 3. P. 1027. <https://doi.org/10.1029/2001GC000252>
- Continuously operating reference stations-Turkey (CORS-TR). <http://cors-tr.iku.edu.tr>. (дата обращения 30.04.2023).
- Duman T.Y., Emre Ö.* The East Anatolian Fault: geometry, segmentation and jog characteristics // Geological Society, London, Special Publications. 2013. V. 372. P. 495–529. <https://doi.org/10.1144/SP372.14>
- Duman T.Y., Çan T., Emre Ö. et al.* Seismotectonic database of Turkey // Bull. Earthquake Eng. 2018. V. 16. P. 3277–3316. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9965-9>
- Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S. et al.* Active fault database of Turkey // Bulletin of Earthquake Engineering. 2018. V. 16(8). P. 3229–3275. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-0041-2>
- European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC).* <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/info.php> (дата обращения 30.04.2023).
- Hancılar U., Şeşetyan K., Çaktı E. et al.* Kahramanmaraş – Gaziantep Türkiye *M7.7* Earthquake, 6 February 2023. Strong Ground Motion and Building Damage Estimations Preliminary Report (v6). Boğaziçi University. 2023. 46 p.
- Lekkas E., Carydis P., Vassilakis E. et al.* The 6 February 6 2023 Turkey-Syria Earthquakes. Newsletter of Environmental, Disaster and Crises Management Strategies. 2023. № 29. 202 p. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17643.82726>
- National Earthquake Information Center (NEIC) USGS. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (дата обращения 30.04.2023).
- Özdemir S.* On the Estimation of Precise Coordinates and Velocities of TNPNG and TNPNG Active Stations // General Command of Mapping J. 2016. V. 155. P. 53–81.
- Özdemir S., Karshoğlu M.* Soft clustering of GPS velocities from a homogeneous permanent network in Turkey // J. Geodesy. 2019. V. 93. P. 1171–1195. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01235-z>
- Richard S., Pagani M.* The GEM Global Active Faults Database // Earthquake Spectra. 2020. V. 36. № 1. P. 160–180. <https://doi.org/10.1177/8755293020944182>

## Preliminary Seismo-Tectonic Analysis of the Catastrophic Earthquake in South-Eastern Turkey on Feb 6, 2023

D. A. Simonov<sup>a, \*</sup> and V. S. Zakharov<sup>a, \*\*</sup>

<sup>a</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

*\*e-mail: dsim\_0@mail.ru*

*\*\*e-mail: zakharov@geol.msu.ru*

**Abstract**—In this paper, we carried out a kinematic analysis of the movements of plates and blocks of the region based on a homogeneous database of displacement velocities of GNSS permanent monitoring stations for the region of southeastern Turkey, where strong earthquakes occurred on February 6, 2023. Along the East Anatolian fault zone from 2008 to 2018, the Arabian Plate was established to shift relative to the Anatolian Plate, corresponding to a left shift (without a normal component) at a rate of 1 cm/yr in the eastern part to 0.8 cm/yr in the western part. Displacements occurred along the Chardak fault, corresponding to a left-hand strike-slip fault, at a rate of less than 0.7 cm/year. The revealed kinematics is confirmed by focal mechanisms and coseismic displacements of the studied earthquakes. The *M*7.5 earthquake that occurred directly on the Chardak fault is not an aftershock of the *M*7.8 earthquake, but is a relatively independent event. An analysis of the seismic regime shows that the stresses on the East Anatolian fault after the main event *M*7.8 are relieved by the first large latitudinal fault zone (the Chardak fault). The results of our study suggest that the counter-clockwise rotation of the Anatolian and Arabian plates associated with the opening of the Red Sea Rift is most likely decisive for the general kinematics of the plates in the region.

**Keywords:** February 6, 2023 earthquake, Gazeantep, Turkey, GNSS data, seismicity, faults, kinematic analysis, seismotectonics, geodynamics, East Anatolian Fault, Anatolian Plate, Arabian Plate