

ТЕКТОНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОСТОЧНО-АНАТОЛИЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 06.02.2023 г. В ТУРЦИИ¹

© 2023 г. Х. Челик¹, Я. И. Трихунков², С. А. Соколов²*, В. Г. Трифонов²,
Е. А. Зеленин², Ю. Каргиноглу¹, К. И. Юшин², В. С. Ломов², Д. М. Бачманов²

¹Фиратский Университет, г. Элязиг, Турция

²Геологический институт РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: sokolov-gin@yandex.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 08.06.2023 г.

Принята к публикации 13.06.2023 г.

При Восточно-Анатолийском землетрясении с $M_w = 7.8$, которое произошло 06.02.2023 г. в 1:17 UTC, был активизирован сегмент Восточно-Анатолийской зоны активных левых сдвигов (EAFZ) северо-восточного простирания протяженностью 361 км. По возникшим сейсморазрывам на протяжении 318 км произошли левосдвиговые смещения. Их максимальная амплитуда 8.5 м наблюдалась севернее эпицентра. К северо-востоку от этой области левосдвиговое смещение в несколько метров выдерживается на значительном протяжении активизированного сегмента и сопровождается поднятием юго-восточного крыла на величину до 1.5 м. К юго-западу от области максимальных смещений сдвиг убывает быстрее, чем на северо-востоке активизированной части EAFZ, а вертикальная компонента смещений переменна, хотя чаще поднято юго-восточное крыло. На крайнем юго-западе сдвиг замещается сбросами, зияющими трещинами и другими проявлениями поперечного растяжения, которые сопровождаются оползнями и в значительной мере являются вторичными сейсмодислокациями. Левосдвиговые смещения произошли также на северных окончаниях западной и восточной ветвей Трансформы Мертвого моря (DST), примыкающей к EAFZ с юга. Несмотря на то, что распределение энергии многочисленных афтершоков вдоль EAFZ в целом пропорционально распределению величин сейсмогенных смещений, подвижка по EAFZ произошла во время и сразу после главного толчка. В северной части DST установлено значительное снижение количества выделенной сильными землетрясениями энергии в течение последних столетий. Мы полагаем, что накопленные в северной части DST тектонические напряжения стали важным геодинамическим источником Восточно-Анатолийского землетрясения.

Ключевые слова: Восточно-Анатолийское землетрясение, Восточно-Анатолийская зона активных разломов, Трансформа Мертвого моря, сейсмогенные смещения, левый сдвиг, афтершоки, накопление тектонических напряжений.

DOI: 10.31857/S0002333723060054, EDN: YLZSBR

ВВЕДЕНИЕ

06.02.2023 г. в Юго-Восточной Турции случились два сильнейших землетрясения (рис. 1). В 1:17 UTC произошло Восточно-Анатолийское землетрясение с $M_w = 7.8$. Его инструментальный эпицентр определен в районе с. Яманчобан ($37^{\circ}10'30.89''$ с.ш.; $37^{\circ}5'15.97''$ в.д.) в 33 км западнее г. Газиантеп (Boğaziçi University Kandilli observatory; boun.edu.tr). Близкое положение эпицентра ($37^{\circ}13'49.95''$ с.ш.; $37^{\circ}1'8.62''$ в.д.) дает Геологическая служба США (USGS; <https://earthquake.usgs.gov/>). Эпицентр находится возле северной части восточной ветви Левантской зоны разломов, или Трансформы Мертвого моря (DST), в 48 км юж-

нее ее сочленения с Восточно-Анатолийской зоной разломов (EAFZ). Это событие стало сильнейшим землетрясением за последние 73 года не только в Турции, но и во всем Восточном Средиземноморье и Кавказско-Ближневосточном регионе. В 10:25 UTC севернее первого произошло второе, Чардагское землетрясение с $M_w = 7.5$ в зоне Чардагского разлома. За обоими сейсмическими событиями последовали многочисленные афтершоки. Их эпицентры образовали два плотных облака, которые удлинены, соответственно вдоль EAFZ на ~360 км и вдоль разломов Чардаг и Улуова на ~200 км; вне облаков афтершоки редки и меньше по магнитудам (рис. 2). USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>) и турецкие источники оценивают глубину гипоцентра Восточно-Анатолийского землетрясения в 10 км. Глубина гипоцентра Чардагского землетрясения – также

¹ Дополнительная информация для этой статьи доступна по doi 10.31857/S0002333723060054 для авторизованных пользователей.

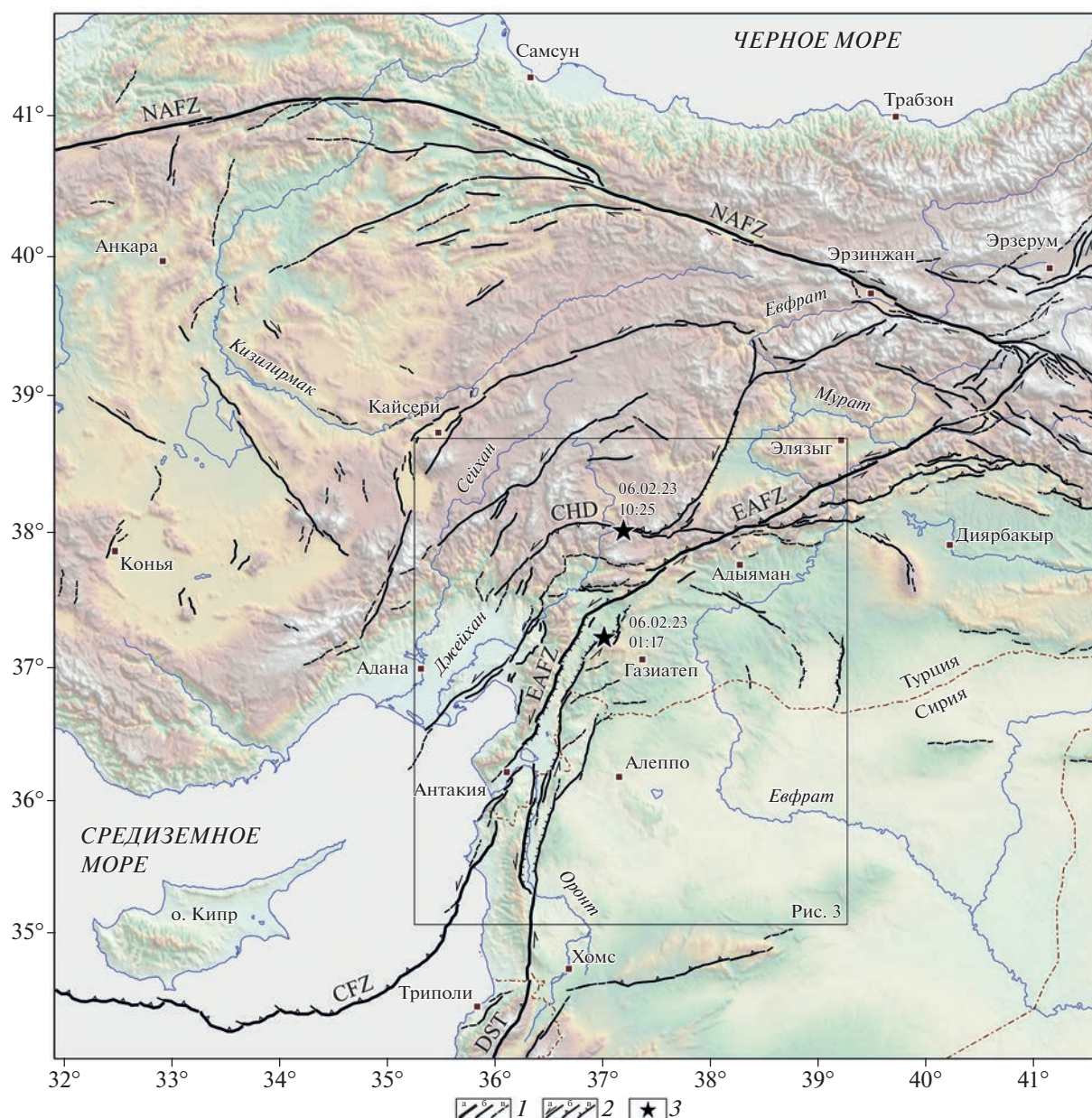


Рис. 1. Активные разломы ЮВ Турции и соседней части Сирии, по данным работ ([Emre et al., 2013; Active ..., 2022] с дополнениями); 1 – активные разломы: а – главные; б – второстепенные; в – предполагаемые; 2 – кинематические типы разломов: а – сдвиги, б – надвиги, в – сбросы; 3 – эпицентры Восточно-Анатолийского и Чардагского землетрясений 06.02.2023 г. Разломы и разломные зоны: EAFZ – Восточно-Анатолийская зона, NAFZ – Северо-Анатолийская зона, DST – Трансформа Мертвого моря, CFZ – Кипрская дуга, CHD – Чардагский разлом

~10 км. Сильные ($M_w \geq 5$) афтершоки произошли на глубинах от 6 до 21 км. Таким образом, оба главных толчка и сильные афтершоки локализованы в верхней части земной коры региона. Оба главных толчка сопровождалась образованием сейсморазрывов, которые обозначают размеры обоих сейсмических очагов и, принимая во внимание глубину гипоцентров, могут рассматриваться как выходы сейсмогенерирующих разрывов на земную поверхность.

Цель статьи – охарактеризовать тектоническое положение, сейсморазрывы и возможную геодинамическую природу только сильнейшего Восточно-Анатолийского землетрясения, произошедшего вблизи EAFZ.

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СИТУАЦИЯ

Восточно-Анатолийское землетрясение произошло вблизи границы Аравийской части Африкано-Аравийской плиты и соседнего сегмента

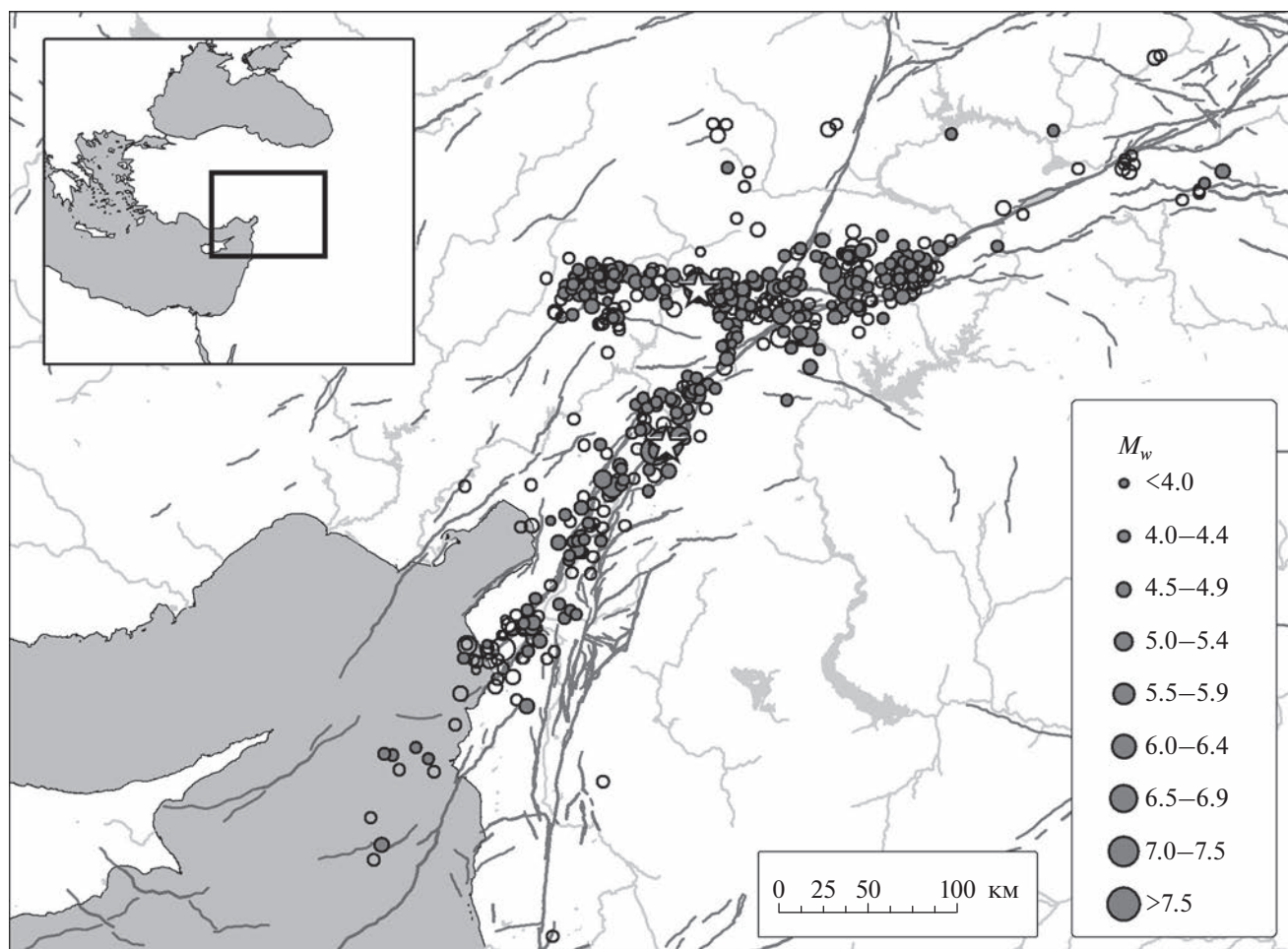


Рис. 2. Афтершоки землетрясений 06.02.2023 г. в ЮВ Турции и соседней части Сирии с магнитудами $M_w \geq 4$, по данным ANSS USGS (<https://earthquake.usgs.gov/>). Темно-серые линии — активные разломы БД AFEAD.

Альпийско-Гималайского коллизионного пояса. Граница маркируется офиолитовой сутурой, обозначенной в Южно-Таврской надвиговой зоне (рис. 3). Тектонические покровы, обдущированные из сутуры в маастрихте, вскрыты на юге Турции возле г. Антакия и на северо-западе Сирии в хребтах Бассит и Курд-Даг [Knipfer et al., 1988].

Южно-Таврская надвиговая зона состоит из нескольких тектонических покровов, интерпретируемых как результат пододвигания остаточного бассейна Неотетиса под микроплиту Таврид [(Robertson et al., 2004; Akinci et al., 2016)]. Коллизия началась в олигоцене—раннем миоцене. Продолжавшееся надвигание по Южно-Таврской зоне обусловило подъем южного края Таврид, который ускорился в позднем плиоцене—раннем плейстоцене, а продолжавшиеся движения по Южно-Таврскому надвигу привели к складчатости накопившихся обломочных толщ.

Одновременно с отделением Аравийской плиты от Африканской, в среднем миоцене, возник-

ла левосдвиговая DST, образовавшая западную границу Аравийской плиты [Garfunkel, Ben-Avraham, 2001]. В позднем плиоцене [Herece, 2008], или, возможно, еще в мессинии [Westaway, 2004] зародилась левосдвиговая EAFZ как новая северо-западная граница Аравийской плиты с Анатолийской малой плитой. В различных частях EAFZ отмечены многочисленные левосдвиговые смещения позднечетвертичных форм рельефа [Şaroğlu et al., 1992; Herece, 2008]. EAFZ косо пересекает прежнюю сутурную границу плиты [Emre et al., 2013] и на северо-востоке смыкается с Северо-Анатолийской зоной разломов (NAFZ), которая образует северную границу Анатолийской плиты. NAFZ возникла в плиоцене [Şaroğlu, 1988], местами унаследовав более древние зоны офиолитов и разломов [Sengör, Yilmaz, 1981]. В позднекайнозойской структуре EAFZ продолжается трогом южного фронта Кипра [Vidal et al., 2005].

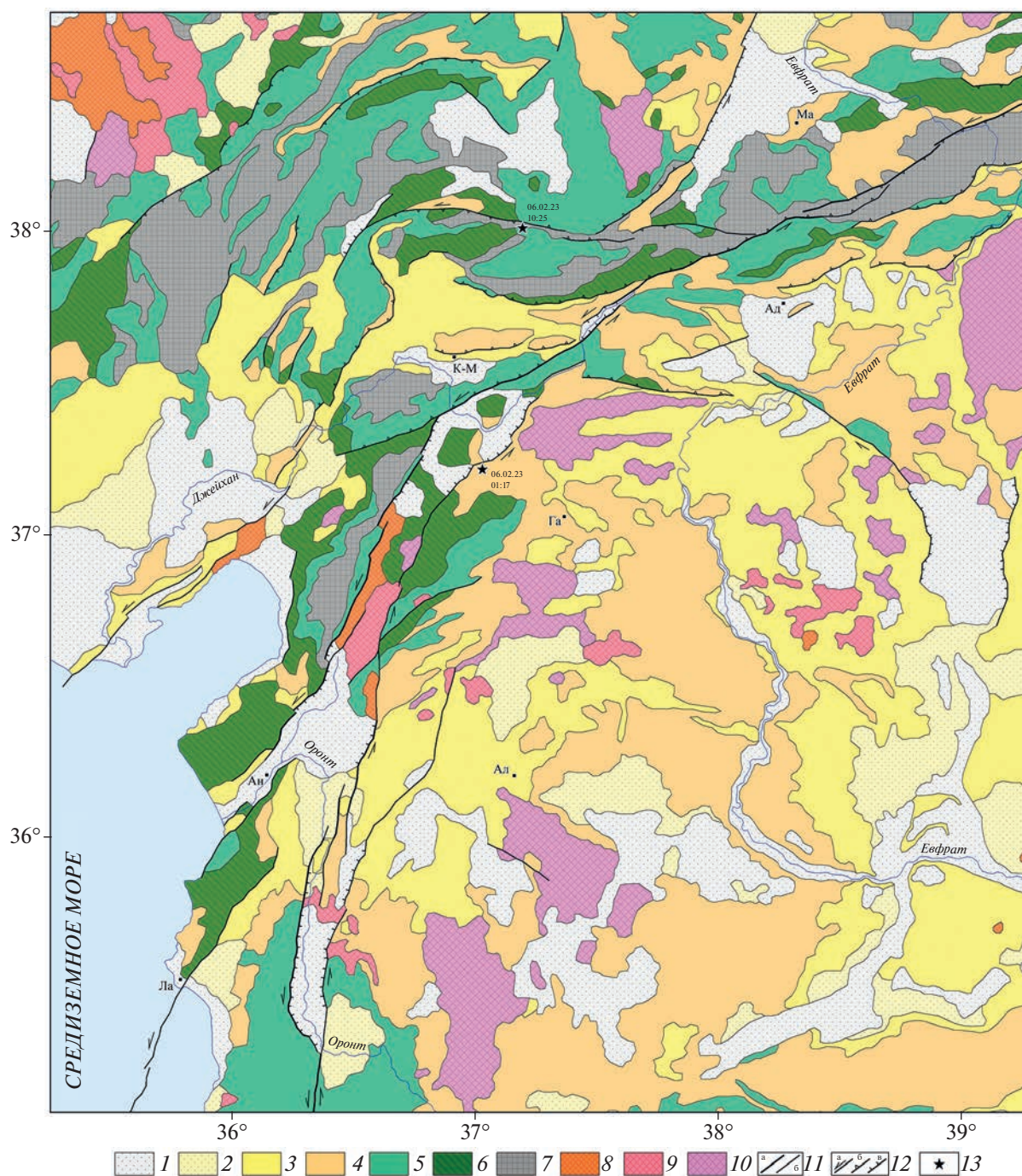


Рис. 3. Упрощенная геологическая карта ЮВ Турции и соседней части Сирии, по данным [Geological Map of Syria, 1986; Geological map of Turkey, 2015] с изменениями. 1 – Четвертичные отложения; 2 – плиоцен; 3 – миоцен; 4 – палеоген и маастрихт; 5 – мезозой нерасчлененный; 6 – мезозойские офиолиты; 7 – палеозой и докембрий нерасчлененные; 8 – квартал вулканический; 9 – плиоцен вулканический; 10 – миоцен вулканический; 11 – новейшие разломы: а – главные разломы Восточно-Анатолийской разломной зоны и трансформы Мертвого моря, б – другие новейшие разломы; 12 – кинематические типы разломов: а – сдвиги, б – надвиги, в – сбросы; 13 – эпицентры Восточно-Анатолийского и Чардагского землетрясений 06.02.2023 г. Населенные пункты: Ад – Адьяман, Ал – Алеппо, Ан – Антакия, Га – Газиантеп, К-М – Караманмараш, Ла – Латакия.

По геологическим данным средняя скорость левого сдвига по EAFZ оценивается в 6–8 мм/год [Westaway, 2004], а скорость четвертичного сдви-

га – ~8.3 мм/год [Нересе, 2008]. Скорость голоценового левого сдвига по северной части DST (сегмент Эль-Габ) – около 5 мм/год [Rukieh et al.,

2005; Trifonov, 2012]. В течение последних двух тысячелетий она возрастает до 6–6.8 мм/год [Meghraoui et al., 2003]. Оба активных пограничных разлома сегмента Эль-Габ DST продолжают на север в Южную Турцию.

Современные тектонические движения в EAFZ и около нее изучены техникой GPS [McClusky et al., 2000]. Согласно сбалансированной модели результатов GPS-измерений [Reilinger et al., 2006], к северо-востоку от сочленения с DST левосдвиговая деформация распределяется в 100-километровой полосе вдоль EAFZ, и ее скорость составляет 9–10 мм/год; между восточным и западным пограничными разломами DST скорость сдвиговой деформации сокращается до 6.8 мм/год, а юго-западнее западной ветви DST — до 5.5 мм/год и сочетается с соизмеримой компонентой поперечного удлинения (растяжения).

Сегментация EAFZ исследуется в течение 40 лет. Предложены различные варианты, опирающиеся на разные критерии [Hempton et al., 1981; Şaroğlu et al., 1992; Duman, Emre, 2013]. На рис. 4 показаны сегменты, которые различаются возрастом и магнитудой последнего сильного землетрясения. Сейсмичность XIX в. началась с землетрясения 1822 г. ($M_s = 7.5$) на юго-западе вблизи сочленения западной ветви DST и EAFZ. Затем она перескочила на северо-запад в район г. Карлиова, где произошло землетрясение 1866 г. ($M_s = 7.2$). В 1872 г. снова случилось землетрясение на юго-западе в Хатае ($M_s = 7.2$). После этого эпицентры сильных землетрясений 1874, 1875, 1893 гг. последовательно смещались от района Карлиова к центру EAFZ. В итоге, почти вся EAFZ была активизирована в XIX в. землетрясениями с магнитудами $M_s = 6.7–7.5$. Единственным исключением остался сегмент Гельбаши—Тюркоглу, где последнее сильное землетрясение произошло в 1513 г. В XX в. сейсмичность ослабла. В 1905 г. произошло землетрясение с $M_s = 6.8$ на северо-востоке сегмента Челикхан—Эркенек. При Бингёльском землетрясении 1971 г. ($M_w = 6.8$) сейсмогенные нарушения протянулись на 20 км и зафиксировано левосдвиговое смещение на 0.2 м [Arpat, Şaroğlu, 1972]. При Элязигском землетрясении 24.01.2020 г. ($M_w = 6.8$) сейсмогенные нарушения охватили центральную часть сегмента оз. Хазар—Синджик.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для характеристики геологического строения, активных разломов и современных тектонических деформаций очаговой области Восточно-Анатолийского землетрясения 06.02.2023 г. и ее обрамления были использованы опубликованные данные, включая результаты прежних ис-

следований авторов в районе EAFZ и DST и Базу данных активных разломов Евразии. Данные о главном толчке и афтершоках Восточно-Анатолийского землетрясения, включая окончательную модель механизма очага главного толчка, были получены от обсерватории Кандилли Университета Богазичи, Турция, и Программы опасности землетрясений Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/>). Уравнения (1), (2) из работы [Kanamori, 1977] и (3) из работы [Scordilis, 2006] были использованы для подсчета сейсмической энергии, выделенной афтершоками, по известным моментным магнитудам M_w или магнитудам объемных волн m_b :

$$M_w = 2/3 \log_{10}(M_0) - 10.7, \quad (1)$$

$$E_s \approx M_0 / (2 \times 10^4), \quad (2)$$

$$M_w = 0.85(\pm 0.04)m_b + 1.03(\pm 0.23), \quad (3)$$

где M_0 — сейсмический момент и E_s — излучаемая энергия. Полученные значения энергии интегрировались вдоль разлома и во времени. Для обеспечения масштаба, сравнимого с натурными данными, энерговыделение суммировалось в скользящем окне 50 км.

Специальный каталог сильных исторических и инструментальных землетрясений в районе EAFZ и северного сегмента Эль-Габ DST [Trifonov, 2012; 2013] был создан суммированием и сравнением различных сейсмических каталогов региона. Сейсмическая энергия, выделенная историческими и инструментальными землетрясениями с установленной M_s оценивалась по формуле Ф.Т. Аптикаева (персональное сообщение):

$$E = 10^{8.1+0.9098(M+1.55)}. \quad (4)$$

В ходе полевых работ параметры сейсморазрывов (простирающие и структурный рисунок, наклон сместителя, амплитуды горизонтальных и вертикальных смещений, направление штриховки на зеркалах скольжения), а также вторичные проявления сейсмогенной геодинамики — оползни, обвалы, сели, снежные лавины, выходы подземных вод и их фонтанирование с выбросом песка и более тонкообломочного материала, детально исследовались на ключевых участках EAFZ и соседних частей DST. Для этого мы использовали приемники GPS для координатной привязки пунктов наблюдений и высокоточные жидкостный компас, клинометр и другое простейшее геодезическое оборудование для измерения сейсмогенных смещений. Беспилотный летательный аппарат (квадрокоптер) DJI Mavic Air Pro 2 использовался для обнаружения, определения кинематики и амплитуд смещений и картирования сейсморазрывов и выявления вторичных сейсморазрывов и выявления вторичных сейсморазрывов как в пределах ключевых участков, так и между ними. С помощью квадрокоптера

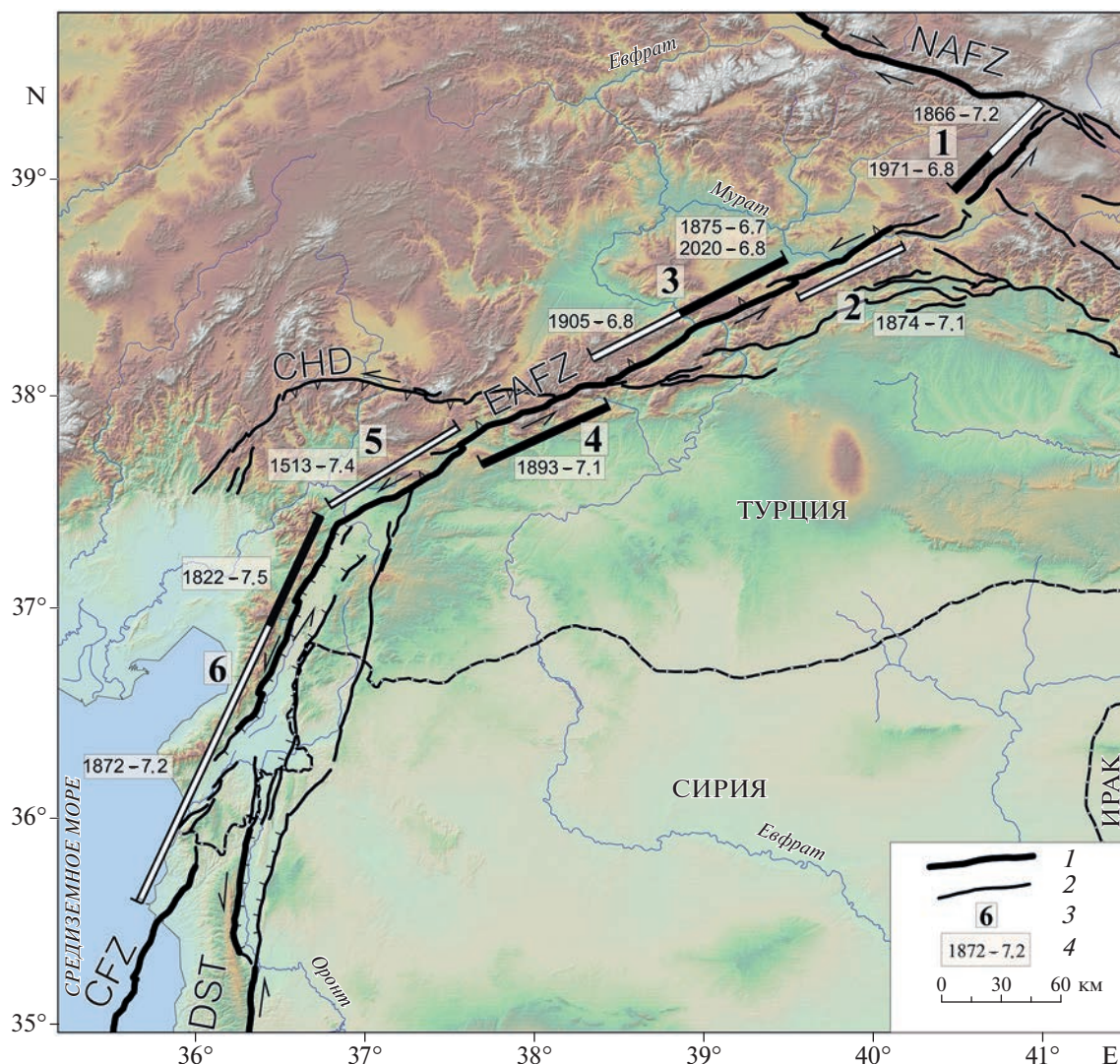


Рис. 4. Сеймотектоническая сегментация EAFZ. Сегментация выполнена по работе [Duman, Emre, 2013] с изменениями; данные о землетрясениях почерпнуты из работ [Ambraseys, 1989; Ambraseys, Jackson, 1998], активные разломы Сирии и северного продолжения DST в Турции изображены по работе [Trifonov, 2012]. Цифрами обозначены сегменты: 1 – Карлиова–Бингёль; 2 – Палу–оз. Хазар; 3 – оз. Хазар–Синджик; 4 – Челикхан–Эркенек; 5 – Гельбаши–Тюркоглу; 6 – Тюркоглу–Антакия.

осуществлялись поиск и идентификация других разрывов и сейсмодислокаций, которые возникли поблизости, отмечались при опросах местных жителей, но труднодоступны для непосредственного наблюдения. Полезным оказалось сравнение базы данных космических снимков Google Earth до землетрясений 06.02.2023 г. и обновленной спустя две–три недели, а также использование ресурса HGM Kure Turkish satellite data base, открывшего доступ к базе данных космических изображений, снятых в первые дни после землетрясения. Они позволили заполнить информацией недоступные для полевого изучения и пропущенные участки разломной зоны.

АФТЕРШОКОВАЯ АКТИВНОСТЬ

Были исследованы афтершоки с магнитудами ≥ 4 за первый месяц после Восточно-Анатолийского землетрясения с магнитудой $M_w = 7.8$. Первичные данные были получены из Программы опасности землетрясений Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov/>). Выбраны землетрясения, попадающие в очаговую область главного толчка (см. рис. 2). На кривой распределения афтершоков во времени видно, что количество и магнитуды землетрясений уменьшаются быстро в первые четыре дня и более медленно после этого с единственным исключением в виде сильного Антакийского афтершока с $M_w = 6.3$

(рис. П-1(1) в Приложении). Такой же рисунок характерен для кривой распределения по дням количества выделенной сейсмической энергии (рис. П-1(2)). Эти данные показывают, что афтершоковый процесс быстро менялся в первые дни, а потом стал постоянным. Поэтому мы построили два графика распределения вдоль EAFZ энергии, выделенной афтершоками: в первые 24 ч после главного толчка (рис. П-2(1) в Приложении) и в течение следующего месяца (рис. П-2(2)). На кривой для первого дня видно, что афтершоки присутствуют по всей длине очаговой области, причем внутри нее количество излученной сейсмической энергии возрастает к северо-востоку (см. рис. П-2(1)). Верхнее плато графика определяется афтершоком с $M_w = 6.7$. На графике распределения энергии в следующий месяц максимум выделенной энергии приходится на окончания очаговой зоны, тогда как ее большая часть остается довольно спокойной (см. рис. П-2(2)). Такое распределение может свидетельствовать о том, что падение напряжения в очаговой области было недостаточным для предотвращения новых толчков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В результате Восточно-Анатолийского землетрясения 06.02.2023 г. вдоль EAFZ возникли разрывы и смещения земной поверхности на протяжении 361 км. На юго-западе смещения продолжаются до г. Самандаг на побережье Средиземного моря. На северо-востоке они ограничены юго-западной частью сегмента оз. Хазар—Синджик, не достигая его центральной части, где зафиксированы нарушения при землетрясении 24.01.2020 г. с $M_w = 6.8$. Кроме того, возникли смещения на ближайших к EAFZ восточной и западной ветвях DST.

Полевой отряд под руководством проф. Х. Челика в составе Я.И. Трихункова, С.А. Соколова, Ю. Карджиноглу, К.И. Юшина и В.С. Ломова исследовал сейсморазрывы и другие деформации 2023 г. на всем протяжении активизированной части EAFZ и в соседних сегментах DST. На этой территории были детально изучены 76 участков (рис. 5). Непрерывность наблюдения сейсмонарушений обеспечивалась съемками с квадрокоптера.

Тщательные обследования, проведенные нами в окрестностях инструментального эпицентра, и опросы местного населения показали полное отсутствие не только сейсморазрывов, но и каких-либо более слабых повреждений земной поверхности. Левосдвиговые смещения вдоль восточной ветви DST появляются севернее т. 43 (см. рис. 5, а также рис. П-3 в Приложении) и прослежены на протяжении 41 км почти до сочленения с EAFZ.

Непосредственно к югу от сейсморазрыва наблюдались рассеянные мелкие трещины, просадки обводненного грунта и мелкие оползни. Амплитуда сдвига быстро возрастает к северу и достигает 3.93 м возле г. Нарли (рис. 6). Вблизи сочленения с EAFZ амплитуда сдвига уменьшается до 1 м (т. 36 на рис. 5). В районе с. Бююкнакар, где соединяются DST и EAFZ, образовалась сложная разрывная структура, состоящая из множества трещин и смещенных фрагментов. Нельзя определить, какой из зон разломов принадлежит та или иная трещина. Предполагается, что несмещенные фрагменты относятся к несмещенному крылу DST.

Левосдвиговое сейсмогенное смещение 06.02.2023 г. по EAFZ достигает максимальной величины ~8.5 м в 23 км юго-западнее сочленения EAFZ с восточной ветвью DST (с. Чигли, т. 17 на рис. 5). Это часть сегмента Гельбаши—Тюркошлу (см. рис. 4). Суммарное смещение в т. 17 складывается из смещений на 5.1 м по северо-западной ветви EAFZ и 3.38 м по ее юго-восточной ветви (рис. 7).

Сейсморазрывы прослеживаются в северо-восточной части сегмента Гельбаши—Тюркошлу за пределы сочленения EAFZ с восточной ветвью DST. В т. 13 амплитуда левого сдвига определена в 5.4 м. В т. 10 наблюдались деформации железнодорожного полотна с его левосдвиговым смещением на 5.7 м (рис. 8а). Интересным объектом оказался неразрушенный бетонный жилой дом, расположенный над сейсмогенным разрывом EAFZ в с. Озан (т. 9 на рис. 5; рис. П-4 в Приложении). Сейсморазрыв прошел вдоль северо-восточной стены дома, оставив на бетоне фундамента и соседнем обнажении известняка полого наклоненную штриховку, свидетельствующую о сочетании доминирующего левого сдвига с поднятием юго-восточного крыла (дома относительно прилегающей облицовки грунта). По смещению этих строительных деталей определены сдвиг на 1.71 м и поднятие юго-восточного крыла на 0.55 м (рис. 9).

На рассматриваемом отрезке EAFZ и северо-восточнее, в сегменте Челикхан—Эркенек (рис. П-5 в Приложении) обычно подняты юго-восточные крылья сейсморазрывов. На участках единого сейсморазрыва поднятие не превышает 1.5 м и составляет в среднем 0.59 м. В одной из локальных структур (см. ниже) оно достигает 5.37 м.

EAFZ осложнена грабенами и депрессиями типа *pull-apart*, в пределах которых единый сейсморазрыв может рассредоточиваться на несколько мелких разрывов, и возрастает вертикальная компонента смещений. Одно из таких нарушений расположено на юго-восточном борту впадины Озан и выражено крутым уступом, сложенным рыхлыми наносами (рис. 10; т. 7—8 на

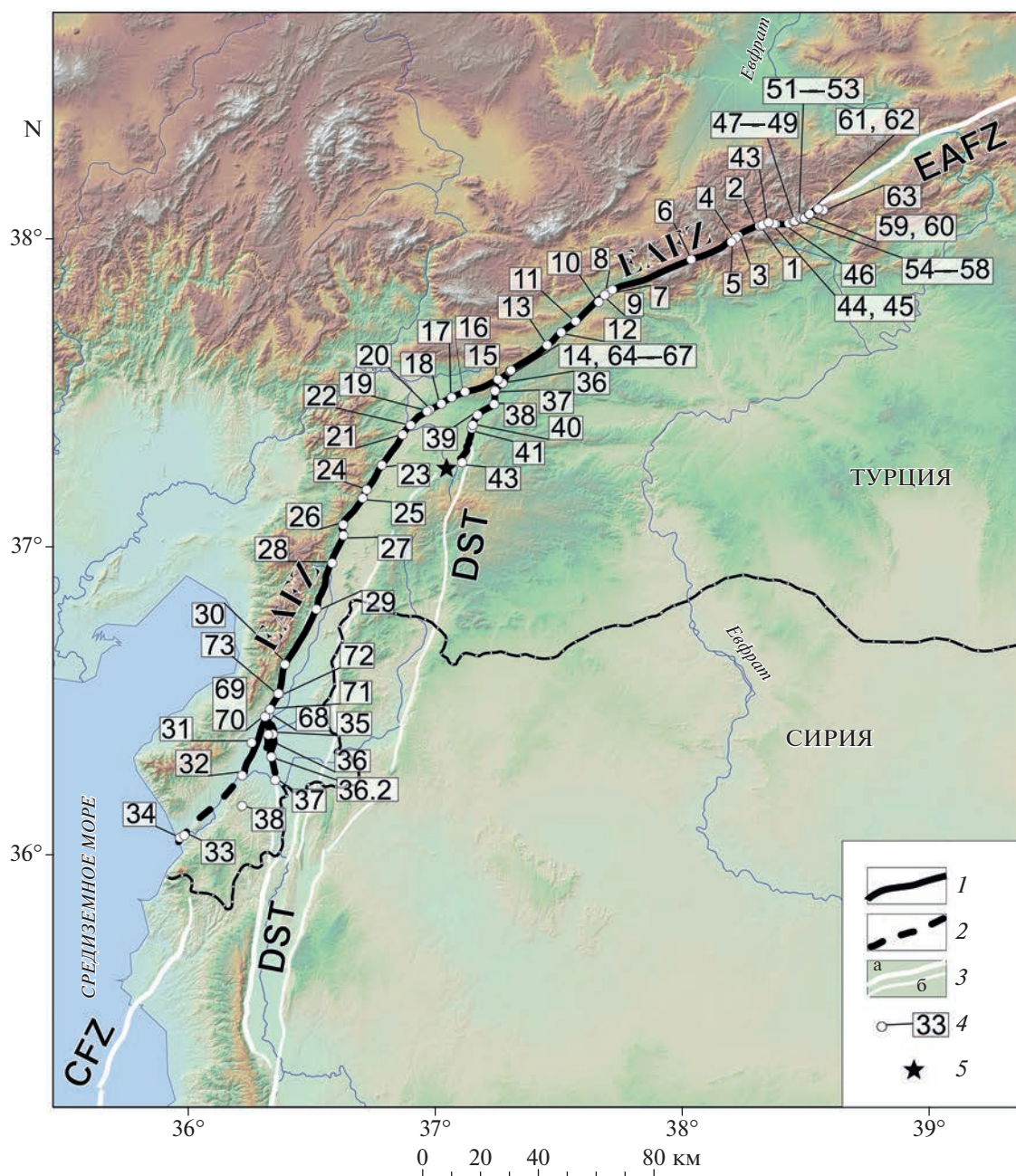


Рис. 5. Пункты изучения тектонических последствий Восточно-Анатолийского землетрясения 06.02.2023 г. в EAFZ и на северных окончаниях DST; 1–2 – активизированная часть EAFZ и DST: 1 – с горизонтальными левосдвиговыми смещениями; 2 – без горизонтальных смещений; 3 – неактивизированные участки разломов: а – главные, б – второстепенные; 4 – точки наблюдений; 5 – эпицентр Восточно-Анатолийского землетрясения 06.02.2023 г.

рис. 5). Высота уступа – 2.75 м при левом сдвиге на 0.8 м. Обращает внимание разная сохранность поверхности нижней и верхней частей уступа. Если его светлая нижняя часть высотой до 1.5 м имеет свежий облик и представляет собой вскрывшуюся плоскость разрыва, то на более темной верхней части видны следы эрозионной обработки. Вероятно, верхняя часть была обнажена еще до землетрясения и не является результатом по-

движки 06.02.2023 г. Далее к северо-востоку, в т. 4, образование грабенообразной депрессии сопровождалось выходом подземных вод, заболачиванием и образованием мелких фонтанов с выбросом песка.

На участках компактного проявления сейсмического разрывообразования видно, что левосдвиговое смещение остается значительным, несколько уменьшаясь к северо-востоку. Так, пло-



Рис. 6. Левосдвиговые смещения по восточной ветви DST возле г. Нарли: сверху — сдвиг дорожного полотна (т. 41 на рис. 5); внизу — снимки с квадрокоптера (т. 40 на рис. 5)



Рис. 7. Максимальные левосдвиговые сейсмогенные смещения по EAFZ севернее эпицентра главного толчка Восточно-Анатолийского землетрясения (т. 17 на рис. 5): 1 — карта сейсморазрывов 06.02.2023 г. с пунктами установленных сдвиговых смещений; 2 — левое смещение усадьбы конструкции на 5.1 м; 3 — левое смещение дорожного полотна на 3.38 м.



Рис. 8. Левосдвиговые смещения по EAFZ северо-восточнее области максимальных смещений: 1 — деформация и левосдвиговое смещение на 5.7 м железнодорожного полотна (т. 10 на рис. 5 и рис. П-3 в Приложении); 2 — сдвиг на 5.35 м дорожного полотна (т. 3 на рис. 5 и рис. П-5 в Приложении).

тина Карадере смещена на 7 м (рис. П-6 в Приложении; т. 6 на рис. 5 и на рис. П-5 в Приложении). Северо-восточнее с. Кавак общее левосдвиговое смещение на 6 м складывается из смещений по двум сейсморазрывам, на 4.1 м по северо-западному и 1.9 м по юго-восточному (т. 5).

Далее на северо-восток левый сдвиг составляет 5.35 м в т. 3 (см. рис. 8б) и 4.4 м в т. 1 на перевале Челикхан (рис. П-7 в Приложении).

Около с. Кавак два сейсморазрыва EAFZ, простирающихся на ЮЗ—СВ, кулисно подставляют друг друга и связаны изогнутым субширотным



Рис. 9. Левосдвиговое смещение на 1.71 м и поднятие юго-восточного крыла на 0.55 м стены дома над сейсмогенным разрывом 06.02.2023 г. Дом поднят и смещен влево относительно облицовки грунта возле дома. Косяя штриховка на известняке рядом с домом (слайд 1, слева) и на бетоне фундамента (слайд 2, справа) указывает на преобладание левого сдвига над вертикальным смещением.

разрывом (рис. 11; т. 5 на рис. 5 и на рис. П-5 в Приложении). По обоим сейсморазрывам выявлены левосдвиговые смещения. По субширотному сейсморазрыву выявлено поднятие южного крыла до 5.37 м. Оно произошло, согласно опросам местных жителей, в момент землетрясения 06.02.23 г. и отражает сжатие, возникающее между двумя кулисно расположенными левыми сдвигами.

Сейсморазрывы Восточно-Анатолийского землетрясения продолжаются на северо-восток от перевала Челикхан в юго-восточный подсегмент Путурге сегмента оз. Хазар—Синджик EAFZ

(см. рис. 5; рис. П-8 в Приложении). Амплитуда левого сдвига составляет 3.3 м в т. 44, где дополняется небольшим смещением по оперяющему сейсморазрыву т. 43. Сейсморазрыв т. 44 следует на северо-восток, где смещение по нему сокращается до 2.65 м в т. 50, но дополняется смещением по оперяющему сейсморазрыву на 0.7 м в т. 48. Далее на северо-восток, в т. 56, левосдвиговое смещение сокращается до 0.43 м., а в т. 59 — 0.16 м и исчезает в т. 62 и т. 63. Северо-восточнее выявлено лишь поле сейсмогенных оползней, заканчивающееся в долине р. Широ в 1 км к северу от с. Ючюка (т. 74).



Рис. 10. Сбросовый уступ на юго-восточном борту грабена Озан (т. 7–8 на рис. 5 и на рис. П-5 в Приложении). Высота уступа — 2.75 м. Неэродированная нижняя часть разломного уступа высотой до 1.5 м отражает смещение при землетрясении 06.02.2023 г.

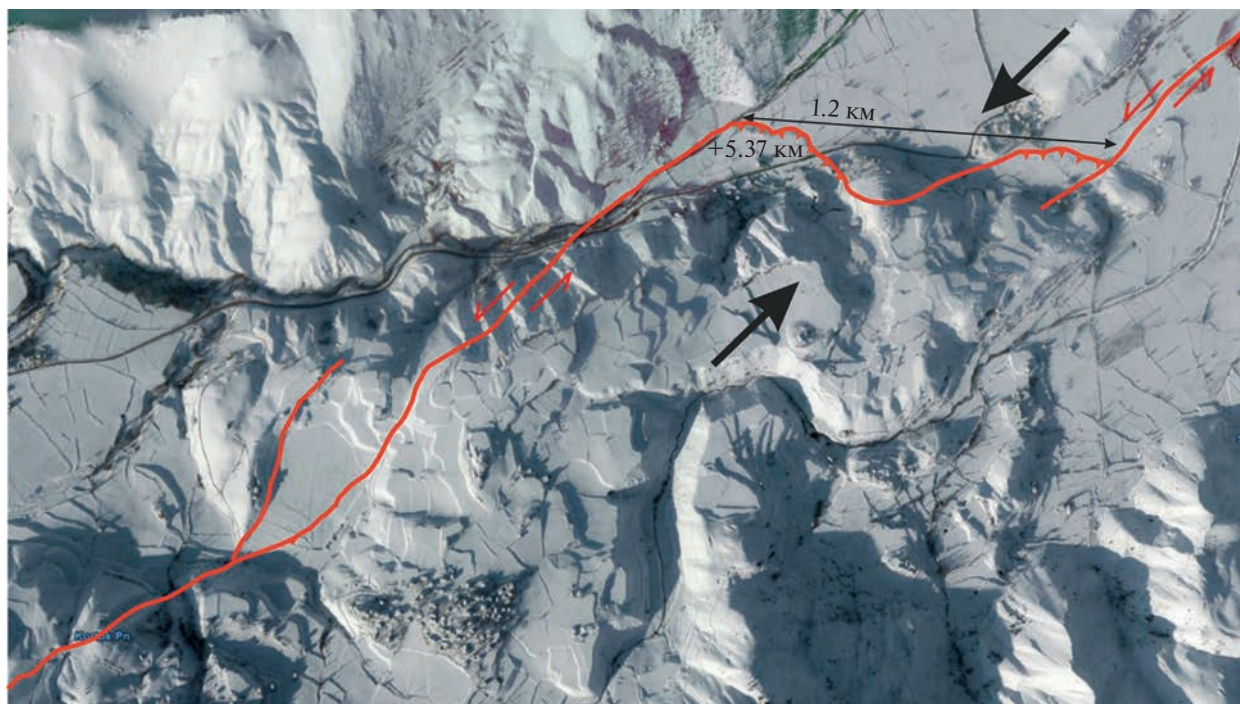


Рис. 11. Кулисное подставление двух левосдвиговых сейсморазрывов EAFZ с субширотным разрывом между ними. У субширотного разрыва значительно поднято южное крыло в результате сжатия между кулисно расположенными сдвигами.



Рис. 12. Сейсмогенные структуры растяжения на юго-западе EAFZ: 1 — сброс на 0.9 м в г. Самандаг (т. 34 на рис. 5 и рис. П-11 в Приложении); 2 — сброс и трещины растяжения на северо-восточной окраине г. Антакия (т. 32); 3 — стенка отрыва скального оползня в 0.8 км северо-западнее с. Тепехан (т. 38).

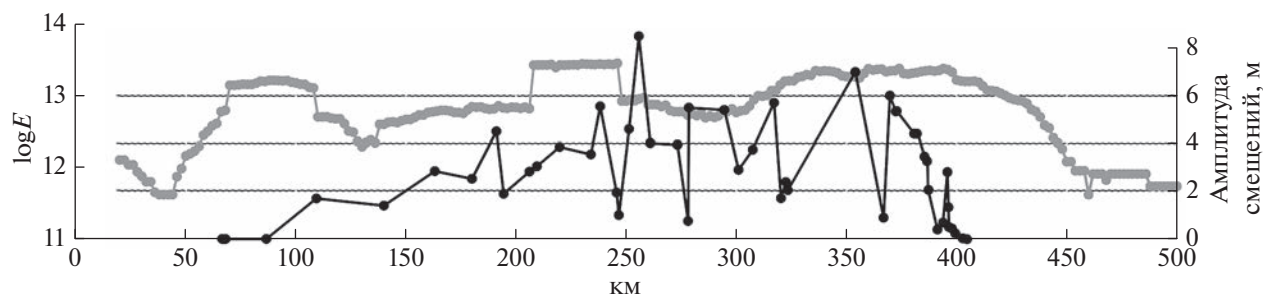


Рис. 13. Сопоставление распределения амплитуд левосдвиговых сейсмогенных смещений вдоль активизированной части EAFZ (черные линии) с аналогичным распределением энергии, выделенной афтершоками (серые линии).

Юго-западнее участка максимального смещения по EAFZ при Восточно-Анатолийском землетрясении (т. 17 на рис. 5 и рис. П-3 в Приложении) продолжаются сейсморазрывы с левосдвиговым смещением. Его величина составляет 5.55 м в т. 21 северо-восточнее с. Тюркоглу (рис. П-9 в Приложении), ~5 м в т. 22 (рис. П-10(1) и П-10(2) в Приложении) и 3.86 м в т. 23 (рис. П-10(3) в Приложении). Отмечены приразломные просадки с выходами грунтовых вод. В т. 25 сдвиговое смещение по сейсморазрыву составляет 2.85 м, сопровождаясь появлением вертикальной компоненты смещения на 1.52 м, затем сокращается до 0.85 м на юго-западном окончании сегмента Челикхан–Эркенек, передаваясь кулисно подставляющему сейсморазрыву северо-восточной части сегмента Тюркоглу–Антакия (см. рис. 4). Здесь, возле с. Ислахия (т. 27 на рис. П-11 в Приложении) амплитуда сдвига составляет 4.5 м. Юго-западнее она сокращается до 2.85 м возле с. Хасса (т. 29), 2.36 м в северной и 2.53 м в южной частях г. Кирикхан (т. 72, 73).

Далее на ЮЮЗ, в районе с. Озсогёксу (точки 68–70 на рис. 5 и рис. П-11 в Приложении) единая зона сейсморазрывов разделяется на две зоны нарушений. Восточная зона протягивается на юг на 16 км вдоль западной ветви DST и, в свою очередь, разделяется на две параллельные ветви (см. рис. П-11 в Приложении). Амплитуда левого сдвига быстро нарастает с удалением от EAFZ и достигает 0.7 м в т. 35 по восточной, более протяженной ветви. Более короткая западная ветвь показывает смещения на 3.6 м в т. 36 (рис. П-12 в Приложении). Ветви параллельны и располагаются близко друг к другу; суммарная амплитуды смещений по ним составляет 4.3 м. Амплитуда сдвига сокращается к югу и полностью исчезает в т. 36.2. Южнее окончания разрыва рассеяны мелкие трещины, просадки обводненного грунта и мелкие оползни, полоса распространения которых продолжается на запад по долине р. Оронт почти до EAFZ. Как и к югу от восточной ветви DST, сейсмодислокации нарушают рыхлые отложения, но не находят видимого продолжения в обнажа-

ющихся южнее скальных породах Алеппского плато на востоке и хребта Джебедь–Ансария на западе.

В западной зоне сейсморазрывов, т.е. на продолжении EAFZ, левосдвиговое смещение составляет 1.7 м к северо-западу от Хатайского аэропорта (т. 31), уменьшается до 0.36 м в южной части взлетной полосы (т. 31.1) и полностью исчезает на северо-восточной окраине г. Антакия (Хатай) (т. 32). Параллельно с уменьшением сдвигового смещения появляются вторичные сейсмогенные нарушения – сбросы амплитудой до 1 м, зияющие трещины и мелкие оползни (рис. 12). Эти разрывы простираются по азимутам 5° – 15° ССВ, близким к простираанию рассматриваемого сегмента EAFZ. В г. Антакия и южнее до г. Самандаг на берегу Средиземного моря указанные структуры растяжения становятся единственными формами сейсмодислокаций EAFZ, связанных с Восточно-Анатолийским землетрясением. Гигантский скальный оползень возник в момент главного толчка северо-западнее с. Тепехан (т. 38) между южным окончанием зоны смещений по EAFZ и DST. Здесь на склоне крутизной 15° долины притока Оронта в среднемиоценовой толще чередования глинистых сланцев и мергелей заложился оползневой амфитеатр со стенкой срыва длиной ~400 м и рвом отседания шириной до 100 м (см. рис. 12(3)). Стенка срыва ориентирована в северо-западном направлении.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Очаговая область Восточно-Анатолийского землетрясения, маркируемая возникшими сейсморазрывами и облаком афтершоков, охватила EAFZ на протяжении 361 км и примыкающие к ней участки DST. По свидетельству местных жителей, сейсмогенные нарушения возникли во время главного толчка и сразу после него и не связаны с последующей афтершоковой активностью. На это указывает и сравнение результатов космических съемок, выполненных 08.02.2023 г. через 2 дня после землетрясения, с результатами

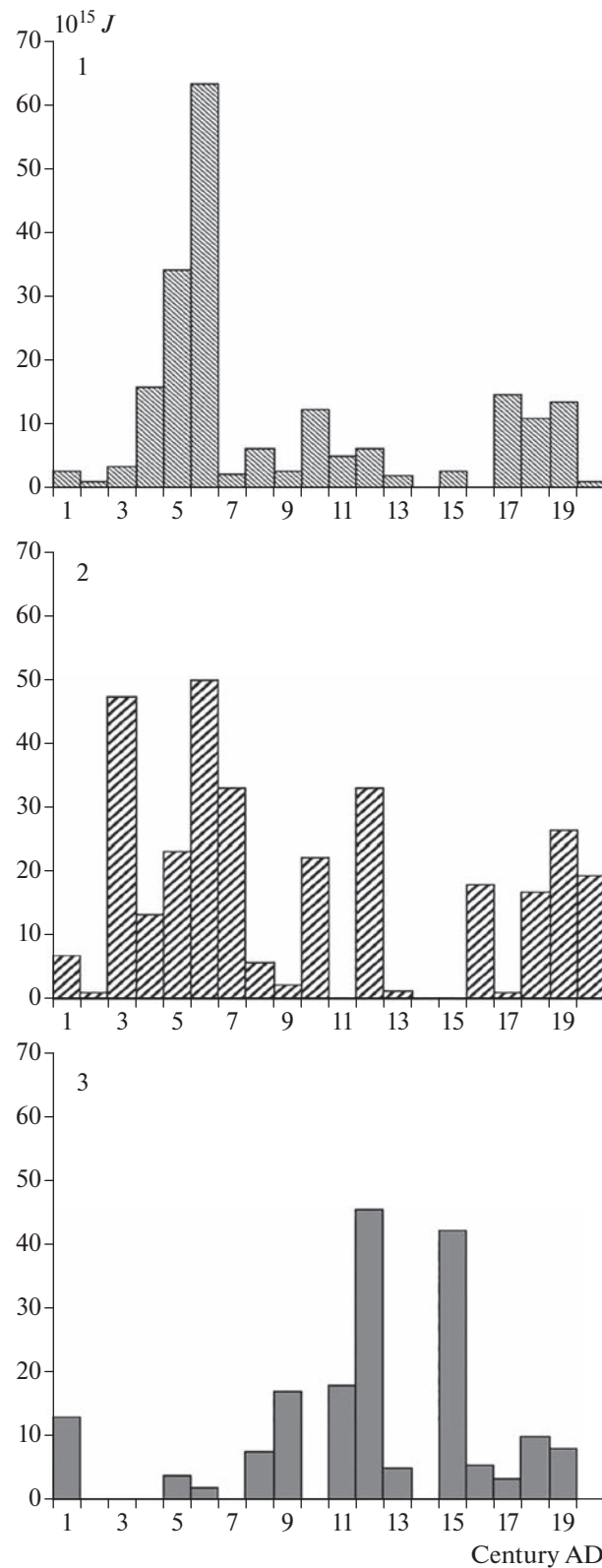


Рис. 14. Распределение по столетиям с I по XX века н.э. количества сейсмической энергии, выделенной сильными историческими и инструментальными землетрясениями: 1 – в EAFZ; 2 – в области сочленения EAFZ и DST; 3 – в северной части DST (сегмент Эль-Габ), по работе [Trifonov, 2013] с изменениями.

наших работ, производившихся месяцем позже. Новых сейсморазрывов мы не обнаружили.

На протяжении 318 км вдоль EAFZ установлены левосдвиговые сейсмогенные смещения. Они обнаружены также на северных окончаниях западной (16 км) и восточной (41 км) ветвей DST. Максимальный левый сдвиг на 8.5 м выявлен в ближайшей к эпицентру части EAFZ, удаленной от него примерно на 50 км. На значительном протяжении EAFZ сдвиг превышает 4 м. На крайнем юго-западе EAFZ, в районе г. Антакия и южнее, сдвиг сменяется растяжением. По суммарной длине активизированной зоны разломов, максимальному смещению и распределению смещений по ее длине Восточно-Анатолийское землетрясение превосходит большинство сильнейших континентальных землетрясений и соизмеримо с такими землетрясениями сдвигового типа, как Эрзинджанское 26.12.1939 г. с $M_s = 7.9$ в Турции и Болнайское 23.07.1905 г. с $M_s = 8$ в Монголии [Вознесенский, 1962; Ambraseys, 1970; 1988; Trifonov, 1985; 2000].

Распределение амплитуд сейсмогенного сдвигового смещения вдоль EAFZ приводит к выводу, что к северо-востоку от участка максимальных смещений амплитуды сдвига в целом выше, чем к юго-западу от него (рис. 13). При этом на северо-востоке сдвиг сопровождается поднятием юго-восточного крыла EAFZ на величины от десятков сантиметров до 1.5 м. Сопоставление амплитуд сдвига и количества выделенной афтершоками сейсмической энергии вдоль EAFZ показывает сходное распределение в области максимальных смещений и к северо-востоку от нее, но нарушение этого сходства на юго-западе активизированной части EAFZ (см. рис. 13). Последнее связано с частичным, а южнее полным замещением сдвига проявлениями поперечного растяжения.

Важными для понимания геодинамической природы Восточно-Анатолийского землетрясения представляются особенности северной части DST и ее воздействие на кинематику EAFZ. Западнее западной ветви DST сейсмогенный сдвиг по EAFZ сменяется поперечным растяжением. Эта особенность кинематического поведения EAFZ отмечена также по результатам GPS-наблюдений [Reilinger et al., 2006].

Было выполнено сопоставление количества сейсмической энергии, выделенной сильными историческими и инструментальными землетрясениями в EAFZ и северной части DST в течение столетних интервалов с I в. н. э. по XX в. (рис. 14). Вековое распределение выделенной энергии в EAFZ вне области сочленения с DST оказалось принципиально сходным с подобным хронологическим распределением во всем Восточном Средиземноморье и Кавказско-Ближневосточном регионе [Trifonov, 2013]. Выделились “византий-

ский пароксизм” с пиком в VI в. и максимум последних столетий (см. рис. 14(1)). В области сочленения DST и EAFZ (см. рис. 14(2)) появляется изменение, которое становится очевидным в северной части DST (грабен Эль-Габ; см. рис. 14(3)). Здесь, наряду с сейсмическими циклами ~300 лет, выявляется гиперцикл с пиком в XII в. и снижением выделенной сейсмической энергии к современности. Это может означать накопление тектонических напряжений на севере DST в течение последних столетий. Накоплению напряжений способствовало относительное сейсмическое затишье в смежном сегменте Гельбаши-Тюркоглу EAFZ, где последнее сильное землетрясение зафиксировано в 1571 г. Длительно накапливавшаяся на севере DST энергия реализовалась 06.02.2023 г. в виде сильнейшего Восточно-Анатолийского землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При Восточно-Анатолийском землетрясении с $M_w = 7.8$, произошедшем 06.02.2023 г. в 1:17 UTC, сейсмогенные разрывы возникли вдоль EAFZ на протяжении 361 км и имели преимущественно левосдвиговую кинематику. Максимальная амплитуда сдвига 8.5 м установлена в центральной части активизированного сегмента EAFZ севернее эпицентра. К северо-востоку от пункта максимальных смещений значительные сдвиговые смещения сохраняются, в целом уменьшаясь к северо-востоку. Сдвиг обычно сопровождается поднятием до 1.5 м юго-восточных крыльев сейсморазрывов. К юго-западу от пункта максимальных смещений величина сдвига сокращается быстрее, и западнее сочленения с западной ветвью DST, на восточной окраине г. Антакия, сдвиг замещается вторичными сейсмодислокациями – сбросами, зияющими трещинами и другими проявлениями поперечного растяжения. Левый сдвиг выявлен также по северным окончаниям западной (на протяжении 16 км) и восточной (на протяжении 41 км) ветвей DST.

Выполнено сопоставление распределения вдоль активизированной части EAFZ суммарного количества выделенной афтершоками сейсмической энергии и амплитуды сдвиговых смещений. Сопоставление показало, что в области максимальных смещений и к северо-востоку от нее обнаруживается сходство этих распределений. На юго-западном окончании активизированной части EAFZ всплеск выделенной сейсмической энергии не соответствует падению, а южнее полному отсутствию сдвигового смещения, что объясняется переходом сдвига в поперечное растяжение. Несмотря на сходство распределения сей-

смогенных подвижек и энергии афтершоков, сейсморазрывы и смещения по ним произошли во время главного толчка или сразу после него. Это показали опросы местных жителей и тождество сейсморазрывов, зафиксированных космической съемкой через два дня после главного толчка и выявленных нашими полевыми исследованиями через месяц после него.

Различие кинематики EAFZ по разные стороны от западной ветви DST и присутствие сейсмогенных подвижек на северных окончаниях обеих ее ветвей указывают на важную роль DST среди геодинамических предпосылок Восточно-Анатолийского землетрясения. Чтобы оценить эту роль, были выполнены расчеты хронологического распределения по столетиям количества сейсмической энергии, выделенной сильными землетрясениями последних двух тысячелетий в EAFZ, области сочленения EAFZ и DST и северной части DST – сегменте Эль-Габ. Установлено, что, если в EAFZ распределение сходно с таковым во всем Восточном Средиземноморье и Кавказско-Ближневосточном регионе, то на севере DST оно отличается. Эта область характеризуется падением количества выделенной сейсмической энергии в течение последних столетий, что позволяет предположить накопление тектонических напряжений. Именно это и стало, по нашему мнению, важной геодинамической предпосылкой столь сильного сейсмического события как Восточно-Анатолийское землетрясение.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Геологический очерк подготовлен в рамках работ по теме FMMG-2023-0006 Геологического института РАН. Остальные исследования и написание статьи выполнены на средства Российского научного фонда, проект № 22-17-00249.

ПРИЛОЖЕНИЕ¹

Рис. П-1. Распределение количества (1) и энергии (2) афтершоков Восточно-Анатолийского землетрясения во времени.

Рис. П-2. Распределение вдоль EAFZ количества сейсмической энергии, выделенной афтершоками после Восточно-Анатолийского землетрясения: (1) – в первые 24 ч после главного толчка; (2) – в течение следующего месяца.

Рис. П-3. Пункты изучения тектонических последствий Восточно-Анатолийского землетрясения 06.02.2023 г. в области сочленения EAFZ и DST. На врезке: расположение вторичных сейсмодислокационных структур на южном продолжении DST: (1) – активизированная часть EAFZ и DST с горизонтальными

ми левосдвиговыми смещениями; (2) – положение первичных и вторичных сейсмодислокаций; (3) – точки наблюдения с указанием измеренных горизонтальных левосдвиговых смещений.

Рис. П-4. Неразрушенный бетонный дом рядом с сейсмогенным разрывом 06.02.2023 г. в с. Озан (т. 9 на рис. П-3).

Рис. П-5. Пункты наблюдений 1–7 в сегменте Челикхан–Эркенек EAFZ; 1 – активизированная часть EAFZ; 2 – точки наблюдения с указанием измеренных горизонтальных левосдвиговых смещений.

Рис. П-6. Левосдвиговое смещение на 7 м плотины Карадере (т. 6 на рис. П-5).

Рис. П-7. Левосдвиговое смещение на 4.4 м горного склона на перевале Челикхан (т. 1 на рис. П-5).

Рис. П-8. Пункты наблюдений 44–63 в подсегменте Путурге сегмента оз. Хазар–Синджик EAFZ. Условные знаки см. на рис. П-3.

Рис. П-9. Левосдвиговое смещение стенок ирригационного канала северо-восточнее с. Тюркоглу (т. 21 на рис. П-3).

Рис. П-10. Левосдвиговые смещения границ полей и полевых проездов в т. 22 (1, 2) и железнодорожного полотна в т. 23 (3, фото из интернета) северо-восточнее с. Нурдаг (см. рис. П-3).

Рис. П-11. Пункты наблюдений в сегменте Тюркоглу–Антакия EAFZ и в смыкающейся с ним западной ветви DST. На врезке 1: положение сейсмодислокаций в области сочленения EAFZ и DST; на врезке 2: положение сейсмодислокаций в долине реки Оронт на южном продолжении DST; 1 – активизированная часть EAFZ и DST с горизонтальными левосдвиговыми смещениями; 2 – то же, предполагаемое; 3 – положение первичных и вторичных сейсмодислокаций; 4 – точки наблюдения с указанием измеренных горизонтальных левосдвиговых смещений.

Рис. П-12. Левосдвиговое смещение конструкции Хатайского аэропорта по западной ветви DST (т. 36 на рис. П-11).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вознесенский А.В.* Изучение области Хангайских землетрясений 1905 г. в Северной Монголии. Тр. Отдела физ. географии Географического об-ва СССР. 1962. № 1. 51 с.
- Active Faults of Eurasia Database (AFEAD), 2022. [data set]. Available from ResearchGate: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25509.58084> (last access: 10 May 2023).
- Akinci A.C., Robertson A.H.F., Ünlügenç U.C.* Sedimentary and structural evidence for the Cenozoic subduction-collision history of the Southern Neotethys in NE Turkey (Çağlayancerit area) // Intern. Jour. of Earth Sci. (Geol. Rundsch.). 2016. V. 105. P. 315–337.

- Ambraseys N.N.* Some characteristic features of the North Anatolian fault zone // *Tectonophysics*. 1970. V. 9. P. 143–165.
- Ambraseys N.N.* Earthquake engineering and structural dynamics // *Engineering seismology*. 1988. V. 17. P. 1–105.
- Ambraseys N.N.* Temporary seismic quiescence // *SE Turkey Geophys. Jour.* 1989. V. 96 (3). P. 311–331.
- Ambraseys N.N., Jackson J.A.* Faulting associated with historical and recent earthquakes in the Eastern Mediterranean region // *Geophys. J. Intern.* 1998. V. 133 (2). P. 390–406.
- Arpat E., Şaroğlu F.* The East Anatolian fault system: thoughts on its development // *Turkey Mineral Res. and Explor. Inst. Bull.* 1972. V. 78. P. 33–39.
- Duman T.Y., Emre Ö.* The East Anatolian Fault: geometry segmentation and jog characteristics // *Geol. Soc. London Special Publ.* 2013. V. 372. P. 495–529.
- Emre Ö., Duman T.Y., Özalp S., Elmasi H., Olgun Ş., Şaroğlu F.* Active fault map of Turkey. General Directorate of Mineral Research and Exploration, Ankara. 2013.
- Garfunkel Z., Ben-Avraham Z.* Basins along the Dead Sea Transform / Ziegler P.A., Cavazza W., Robertson A.H.F., Crasquin-Soleau S. (eds.). *Peri-Tethys Memoir 6: Peri-Tethyan Rift/Wrench Basins and Passive Margins*. *Mémoires du Muséum national d'Histoire naturelle*. 2001. V. 186. P. 607–627.
- Geological map of Syria, 1 : 1000000, 1986 / Editor in chief: V.P. Ponikarov. Responsible executor: I. Mikhailov. / The General Establishment of Geology and Mineral Resources, Ministry of Petroleum and Mineral Resources, Damascus.
- Geological map of Turkey, 1 : 1000000, 2015 / General director: Yusuf Ziya Coşar. / General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA), Ankara.
- Hempton M.R., Dewey J.F., Şaroğlu F.* The East Anatolian transform fault: along strike variations in geometry and behavior. *EOS T AM Geophys.* 1981. UN 62. 393 p.
- Herece E.* Atlas of the East Anatolian Fault. General Directorate of Mineral Research and Exploration (MTA). Special Publication Series, Ankara. 2008.
- Kanamori H.* The energy release in great earthquakes // *J. Geophysical Research*. 1977. V. 82 (20). P. 2981–2987.
- Knipper A.L., Savelyev A.A., Rukieh M.* Ophiolitic association of North-Western Syria // *Geotectonics* 1988. V. 22(1). P. 73–82.
- McClusky S.C., Balassanian S., Barka A.A., Ergintav S., Georgie I., Gurkan O., Hamburger M., Hurst K., Kahle H., Kastens K., Kekelidse, G., King R., Kotzev V., Lenk O., Mahmoud S., Mishin A., Nadaria M., Ouzounis A., Paradisiss D., Peter Y., Prilepin M., Reilinger R.E., Sanli I., Seeger H., Tealeb A., Toksöz N., Veis V.* Global Positioning System constraints on plate kinematics and dynamics in the Eastern Mediterranean and Caucasus // *Jour. Geophys. Res.* 2000. V. 105 (B3). P. 5695–5719.
- Meghraoui M., Gomez F., Sbeinati R., Van der Woerd J., Mouty M., Darkal A.N., Radwan Y., Layyous I., Al Najjar H., Darawcheh R., Hijazi F., Al-Ghazzi R., Barazangi M.* Evidence for 830 years of seismic quiescence from palaeoseismology, archaeoseismology and historical seismicity along the Dead Sea fault in Syria // *Earth and Planet. Sci. Lett.* 2003. V. 210. P. 35–52.
- Reilinger R., McClusky S., Vernant Ph., Lawrence Sh., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F., Guliev I., Stepanyan R., Nadariya M., Hahubia G., Mahmoud S., Sark K., ArRajehi A., Paradisiss D., AlAydrus A., Prilepin M., Guseva T., Evren E., Dmitritsa A., Filikov S.V., Gomez F., Al-Ghazzi R., Karam G.* GPS constraints on continental deformation in the Africa–Arabia–Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. P. B05411. <https://doi.org/10.1029/2005JB004051>
- Robertson A., Unlügenç Ü.C., Inan N., Taşlı K.* The Misis-Andirin Complex: a Mid-Tertiary mélange related to late-stage subduction of the Southern Neotethys in Southern Turkey // *J. Asian Earth Sci.* 2004. V. 22(5). P. 413–453.
- Rukieh M., Trifonov V.G., Dodonov A.E., Minini H., Ammar O., Ivanova T.P., Zaza T., Yusef A., Al-Shara M., Jobaili Y.* Neotectonic Map of Syria and some aspects of Late Cenozoic evolution of the north-western boundary zone of the Arabian plate // *J. Geodyn.* 2005. V. 40. P. 235–256.
- Şaroğlu F.* Age and offset of the North Anatolian fault // *METU J. pure and applied sci.* 1988. V. 21(1/3). P. 65–79.
- Şaroğlu F., Emre Ö., Kuşçu İ.* The East Anatolian fault zone of Turkey // *Annales Tectonicae. Special Issue*. 1992. V. 6. P. 99–125.
- Scordilis E. M.* Empirical Global Relations Converting MS and mb to Moment Magnitude // *J. Seismology*. 2006. V. 10. P. 225–236.
- Sengör A.M.C., Yilmaz Y.* Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach // *Tectonophysics*. 1981. V. 75. P. 181–241.
- Trifonov V.G.* Development of active faults // *Geotectonics*. 1985. V. 19(2). P. 95–103.
- Trifonov V.G.* Using active faults for estimating seismic hazard // *J. earthquake prediction research*. 2000. V. 8(2). P. 157–174.
- Trifonov V.G.* (Ed.) 2012. Neotectonics, recent geodynamics and seismic hazard of Syria. Moscow: GEOS. 204 p. + 12 p. color inset + 4 sh. color insert.
- Trifonov V.G.* Cyclicity of Late Holocene seismicity in the Alpine-Himalayan belt // *Geotectonics*. 2013. V. 47 (6). P. 418–430. <https://doi.org/10.1134/S001685211306006X>
- Vidal N., Klaeschen D., Kopf A., von Huene R., Krasheninnikov V.A.* Seismic images from southeast of Cyprus to the Syrian coast / Hall J.K., Krasheninnikov V.A., Hirsch F., Benjamini Ch., Flexer A. (eds.) *Geological Framework of the Levant. V. 2: The Levantine Basin and Israel. Part 3 – The Levantine Basin. Historical Production-Hall, Jerusalem*. 2005. P. 41–56.
- Westaway R.* Kinematic consistency between the Dead Sea Fault Zone and the Neogene and Quaternary left-lateral faulting in SE Turkey // *Tectonophysics*. 2004. V. 391(1/4). P. 203–237.

Tectonic Aspects of the East Anatolian 06.02.2023 Earthquake in Turkey

Hasan Çelik^a, Y. I. Trikhunkov^b, S. A. Sokolov^{b, *}, V. G. Trifonov^b, E. A. Zelenin^b, Y. Karginoğlu^a,
K. I. Yushin^b, V. S. Lomov^b, and D. M. Bachmanov^b

^a*Faculty of Engineering, Department of Geological Engineering, Firat University, Elazığ, 23119 Turkey*

^b*Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: sokolov-gin@yandex.ru*

Abstract—During the East Anatolian earthquake with $M_w = 7.8$, which occurred on February 6, 2023 at 1:17 UTC, the 361 km long segment of the NE-trending East Anatolian active left-lateral fault zone (EAFZ) was activated. A left-lateral displacement took place at a distance of 318 km on formed seismic ruptures. Its maximum magnitude of 8.5 m is registered northward of the earthquake epicenter. To the northeast, the displacement of several meters is maintained over a significant length of the activated segment and is accompanied by uplift of the south-eastern side of the ruptured zone at up to 1.5 m. To the southwest of the maximum displacement area, the strike slip decreases from it at shorter distances compared to the northeastern part and the vertical component varies, although the southeastern side is mostly uplifted. In the terminal southwest, the strike slip is replaced by normal faults, gaping fractures, and other manifestations of transverse extension, which are accompanied by landslides and are mainly secondary seismic dislocations. Left lateral slip also occurred at the northern ends of the western and eastern branches of the Dead Sea Transform (DST), adjacent to the EAFZ from the south. Despite the fact that the energy distribution of numerous aftershocks along the EAFZ is generally proportional to the distribution of offsets on seismic ruptures, the slip on the EAFZ occurred during and immediately after the main shock. In the northern part of the DST, a significant decrease in the amount of energy released by strong earthquakes during the last centuries has been established. We consider that the tectonic stress accumulated in the northern part of the DST became the important geodynamic source of the East Anatolian 02.06.2023 earthquake.

Keywords: East Anatolian earthquake, East Anatolian active fault zone, Dead Sea Transform, seismic ruptures and offsets, left-lateral fault, aftershocks, accumulation of tectonic stress