

СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 551: 550.34

КАРАМАНМАРАШСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2023 Г. В ТУРЦИИ:
СЕЙСМИЧЕСКОЕ ДВИЖЕНИЕ ПО СОПРЯЖЕННЫМ РАЗЛОМАМ© 2023 г. Член-корреспондент РАН С. А. Тихоцкий^{1,*}, Р. Э. Татевосян¹, Ю. Л. Ребецкий¹,
А. Н. Овсяченко¹, А. С. Ларьков¹

Поступило 24.04.2023 г.

После доработки 25.04.2023 г.

Принято к публикации 25.04.2023 г.

Землетрясения в Турции (провинция Караманмараш) в феврале 2023 г. не укладываются в привычную последовательность: главный толчок — афтершоки. Согласно статистическому закону Бота магнитуда сильнейшего афтершока ожидается на единицу меньше магнитуды главного толчка. Между тем для последовательности толчков в Турции эта разница составляет всего 0.1. В турецких публикациях первое из сильнейших землетрясений называется Пазарджикским ($M_w = 7.8$), а второе — Эльбистанским ($M_w = 7.7$). Каждое из этих землетрясений породило свою систему поверхностных разрывов и афтершоковые последовательности, по-разному ориентированные в пространстве. Цель исследования — оценить, обусловлено ли возникновение второго землетрясения полем напряжений, существовавшим ранее, или оно возникло вследствие главного толчка. Если реализован второй сценарий, это значит, что поле напряжений может меняться в окрестности сильного землетрясения почти мгновенно (разница во времени между землетрясениями менее 9 ч).

Ключевые слова: землетрясение, сейсмический очаг, сейсмология, тектонофизика, сеймотектоника, активные разломы, Турция, Караманмараш

DOI: 10.31857/S2686739723600765, **EDN:** WGONHT

Землетрясения в Турции (провинция Караманмараш) в феврале 2023 г. не укладываются в привычную последовательность: главный толчок — афтершоки. Согласно статистическому закону Бота [1] магнитуда сильнейшего афтершока ожидается на единицу меньше магнитуды главного толчка. Между тем для последовательности толчков в Турции эта разница составляет всего 0.1. В турецких публикациях первое из сильнейших землетрясений называется Пазарджикским ($M_w = 7.8$), а второе — Эльбистанским ($M_w = 7.7$) [2, 3]. Каждое из этих землетрясений породило свою систему поверхностных разрывов и афтершоковые последовательности, по-разному ориентированные в пространстве. Цель исследования — оценить, обусловлено ли возникновение второго землетрясения полем напряжений, существовавшим ранее, или оно возникло вследствие главного толчка. Если реализован второй сценарий, это значит, что поле напряжений может меняться в окрестности сильного землетрясения почти мгновенно (разница во времени между землетрясениями менее 9 ч).

ТЕКТОНИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Очаги Караманмарашских землетрясений связаны с границей Аравийской и Анатолийской плит (рис. 1). На рисунке показаны только активные разломы, которые в базе данных [4] классифицированы как надежно идентифицированные.

Граница блоков трассируется Восточно-Анатолийской зоной разломов — крупнейшей структурой протяженностью около 600 км, реализующая до 2/3 общего смещения между Аравийской плитой и Анатолийским блоком Альпийско-Гималайского пояса [7]. Активность разлома подтверждается оценкой скорости левого сдвига за последние 4 млн лет в 8 мм/год [8], а за последние 0.9–0.8 млн лет — 13–15 мм/год [9].

СЕЙСМИЧНОСТЬ

За инструментальный период наблюдений сильнейшее землетрясение на Северо-Анатолийском разломе имело магнитуду $M_w = 7.8$ — Эрзинджан, 1939 г. (рис. 2), но в пределах Восточно-Анатолийских разломов сейсмических событий с $M_w \geq 7.0$ не было известно. Здесь происходили землетрясения в интервале магнитуд от 6.0 до 6.8 в 1986, 2003, 2010 и 2020 г. Эпицентры располагаются в среднем на расстоянии 100 км друг от друга

¹Институт физики Земли Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: direction@ifz.ru

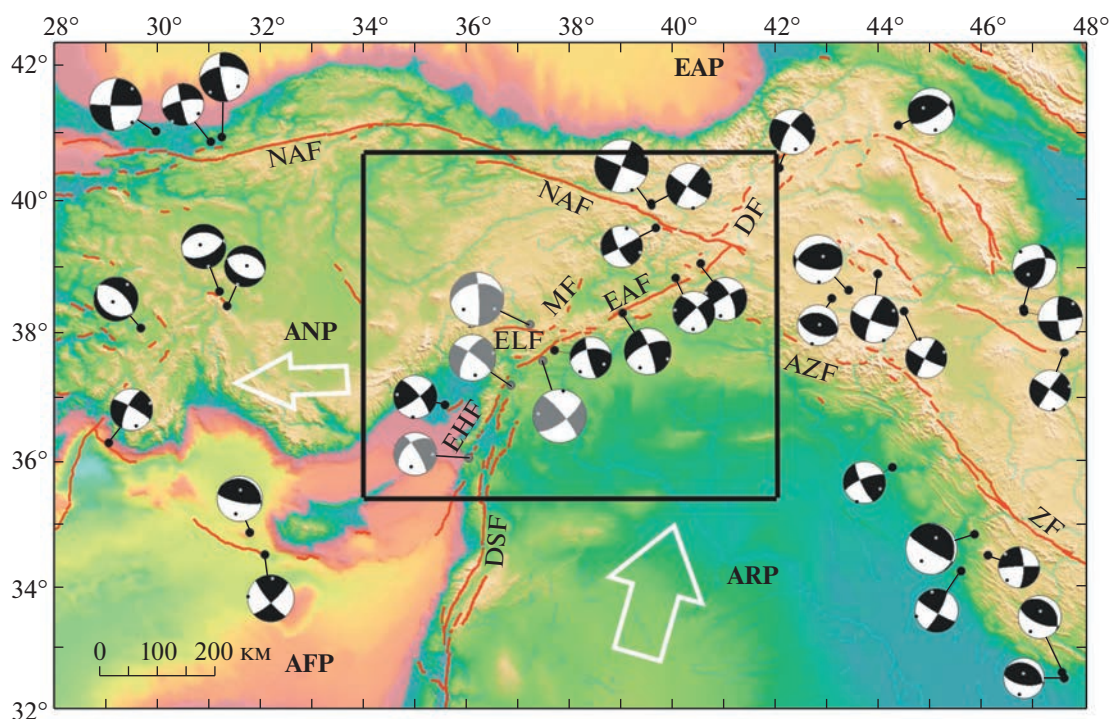


Рис. 1. Сейсмотектоническое положение очагов землетрясений в феврале 2023 г. в Турции. Основные структуры. Плиты: Анатolian (ANP), Аравийская (ARP), Африканская (AFP), Евразийская (EAP); разломы: Северо-Анатолийский (NAF), Восточно-Анатолийский (EAF), Мертвого моря (DSF), Думлу (DF), Анатолийско-Загросский (AZF), Загросский (ZF), Восточно-Хатайский (EHF), Каратас-Туркоглу (KTF), Догансеhir (DGF), Эльбистан (ELF), Малатия (MF). Белые стрелки показывают направление движения плит. Черные точки – эпицентры землетрясений с $M_w \geq 6.0$; закрашенные круги – механизмы очагов (закрашена область растяжения; для февральских землетрясений область растяжения закрашена серым). Механизмы по данным CMT [5]; GEM [6], USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>). Область в квадрате более детально показана на рис. 2.

вдоль восточного сегмента зоны Восточно-Анатолийских разломов; в западном сегменте, где происходит сочленение с зоной трансформных разломов Мертвого моря (DSF), сильных землетрясений не отмечено. Нет их и в зоне разлома Догансеhir (DGF), где расположен очаг второго сильного ($M_w = 7.7$) землетрясения (номер 3 на рис. 2). Эпицентр 1986 г. располагается непосредственно в очаговой области главного толчка февральского землетрясения, являясь, в некотором смысле, его “репетицией”.

ГЛАВНЫЙ ТОЛЧОК И АФТЕРШОКИ

Главный толчок и афтершоки полностью заполнили брешь в сейсмичности, которая существовала в западном сегменте Восточно-Анатолийских разломов (рис. 3). Следует отметить афтершоки, расположенные на удалении 200–300 км от их основной массы, в районе сочленения Восточно-Анатолийской зоны разломов с горной системой Загроса (AZF) и дальше на северо-восток до пересечения с Северо-Анатолийской зоной (NAF), где располагался очаг землетрясения с $M_w = 6.1$ в мае 2003 г.

Оба землетрясения с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.7$ моделируются как сложные очаги, состоящие из трех субисточников каждый (USGS). Однако развитие подвижки в очагах этих землетрясений существенно различается. При главном толчке первый субочаг относительно небольшой (длина менее 50 км, величина подвижки менее 1 м). Максимальное движение произошло в третьем субочаге: длина разрыва 175 км, величина максимальной подвижки почти 8 м. Максимальное количество сейсмического момента приходится с 20 по 30 секунды после начала процесса вспарывания. Эльбистанское землетрясение сразу началось с самого большого субочага протяженностью 75 км, в котором реализовалась максимальная подвижка 12 м; максимальный момент выделился с 7 по 12 секунды.

РАЗРЫВЫ НА ПОВЕРХНОСТИ

Очаги Караманмарашских землетрясений образовали поверхностные разрывы (рис. 2). На момент составления схемы сейсмотектонические разрывы картированы по дистанционным данным, как путем прямого выявления свежих раз-

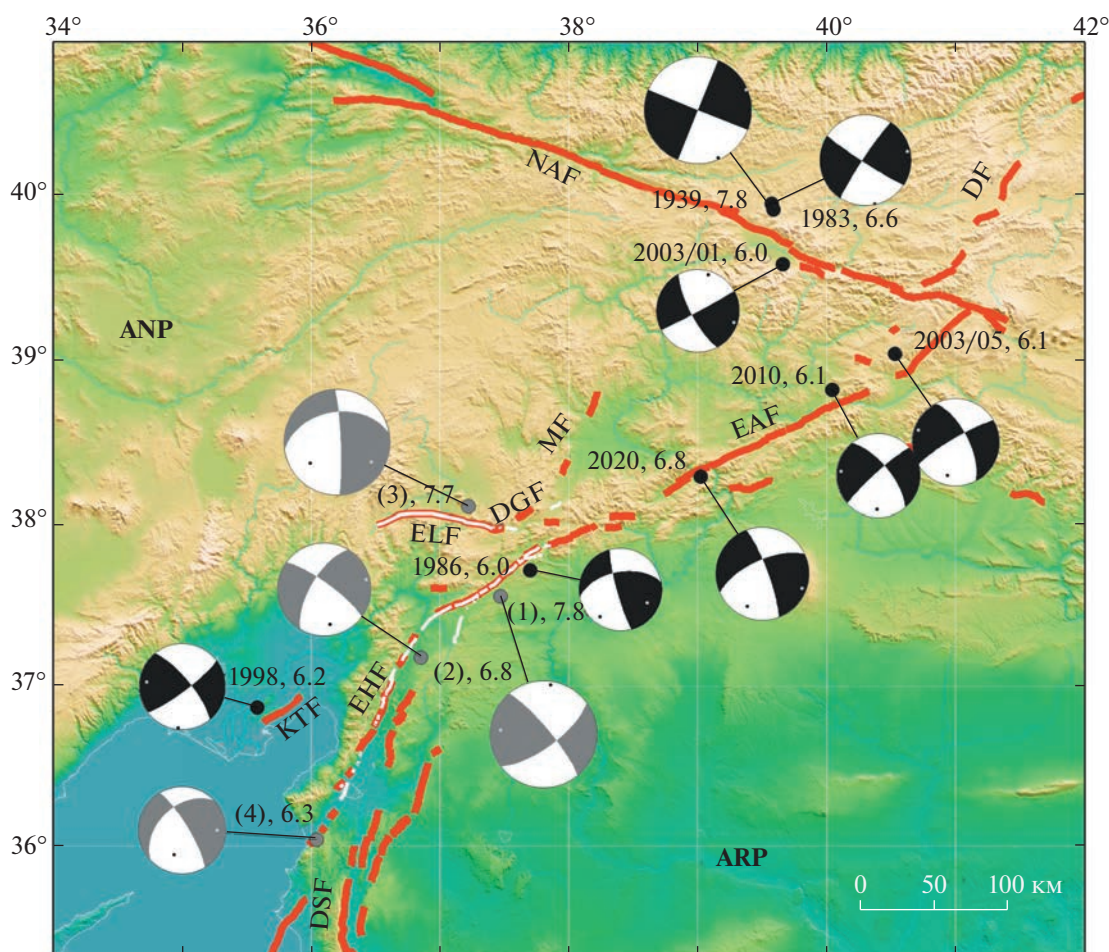


Рис. 2. Активные разломы (красные линии) и косейсмические разрывы (белые) на поверхности. Обозначения даны на рис. 1. Приведены годы событий и магнитуды. Для февральских землетрясений в скобках указан номер (1 — главный толчок).

рывов [10, 11], так и с помощью моделирования данных радарной космической съемки [11].

Кинематика косейсмических разрывов первого, Пазарджикского землетрясения, соответствует решению механизма очага и представляет собой левый сдвиг северо-восточного простирания. Оценки длины системы разрывов — от 240 км [10] до 320 км [11]. Структурный рисунок системы разрывов сложный. В районе инструментального эпицентра происходит изгиб ориентировки системы разрывов с близмеридиональной (ССВ) на северо-восточную. Здесь же появляется обособленная, короткая ветвь субмеридионального (ССВ) простирания. Максимальные горизонтальные смещения по основному сегменту варьируют от 4 [10] до 7 м [2, 3]. Вертикальное смещение составляет 1–2 м, поднято восточное крыло [3]. Очаг землетрясения охватил не менее трех ранее выделенных сегментов Восточно-Анатолийской зоны разломов и короткий участок на север-

ном окончании зоны трансформных разломов Мертвого моря.

Очаг второго, Эльбистанского землетрясения с магнитудой 7.7 (номер 3 на рис. 2) охватил не менее двух сегментов активных разломов. Восточное окончание системы разрывов не согласуется с известными активными разломами. Общее простирание системы — субширотное, длина — около 135 км [10]. Максимальная величина левого сдвига по основному сегменту составила 8.5 м [10].

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ

Инверсия напряжений выполнена по данным о механизмах очагов землетрясений из каталогов международных и региональных сейсмологических центров ([5, 6] ESMC (www.emsc.eu); KOERI (<http://www.koeri.boun.edu.tr>); ГС РАН (<http://www.admobninsk.ru>)), произошедших с 1951 до конца 2022 г. Для расчета кулоновых напряжений при оценке потенциальной опасности

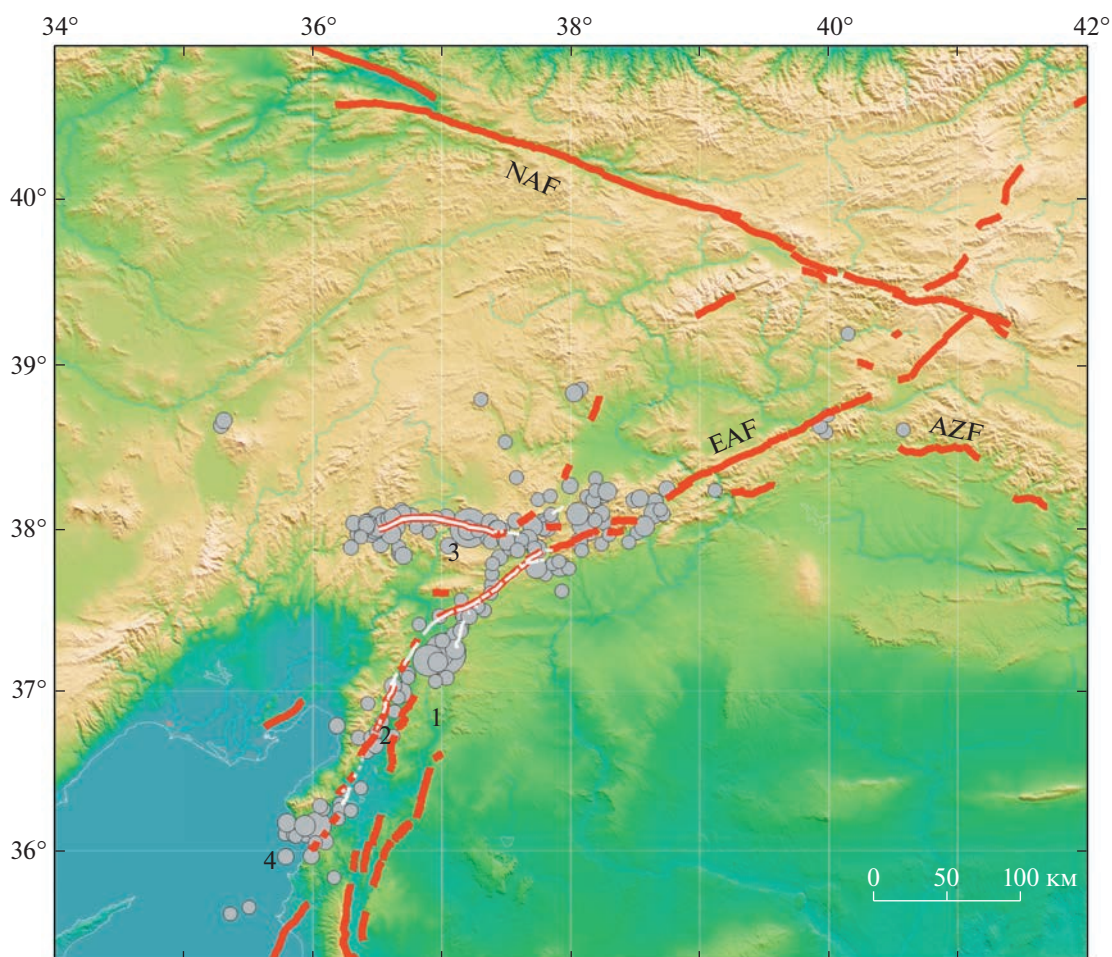


Рис. 3. Эпицентры главного толчка и афтершоков с $M_w \geq 4.5$ по данным USGS.

разломов использована база данных [4] (все разломы, без учета надежности их картирования). Реконструкция напряжений выполнялась методом катакластического анализа разрывных смещений (МКА) [12, 13]. Анализ начинается с создания однородной выборки землетрясений, куда включаются “похожие” механизмы очагов. На первом этапе интерпретации определяются напряжения в виде ориентации главных осей тензора напряжений и коэффициент Лоде-Надаи, описывающий форму эллипсоида напряжений. На втором — максимальные касательные напряжения и эффективное всестороннее давление, нормированное на прочность сцепления массива (τ_c). Число землетрясений с данным об их механизмах очагов и плотность распределения эпицентров землетрясений позволяют говорить о реконструкции напряжений с усреднением 60–80 км. На рис. 4 показаны параметры напряженного состояния, отвечающие в каждом узле наиболее ранней и наиболее поздней по времени выборке землетрясений. Средняя разница во времени между двумя

выборками для 520 узлов расчетной сетки составляла 15–20 лет, что позволяет увидеть тенденцию изменения напряженного состояния исследуемого региона перед землетрясением 06.02.2023.

На начальном этапе, отвечающем в основном периоду 1967–2012 гг. (рис. 4 а), режим горизонтального сдвига охватывает практически всю зону Восточно-Анатолийских разломов, за исключением небольшого юго-восточного участка с режимами горизонтального растяжения и растяжения со сдвигом (транстенсия), который распространялся в зону трансформных разломов Мертвого моря, переходя в режим вертикального сдвига. Перед Караманмарашскими землетрясениями (завершающий этап напряженного состояния 1997–2022 гг.) произошли кардинальные изменения геодинамического типа напряженного состояния (рис. 4 б). Зона с режимом горизонтального растяжения расширилась вплоть до эпицентра главного толчка. Появилась обширная область горизонтального растяжения со сдвигом в северо-восточном сегменте Восточно-Анатолийского разлома

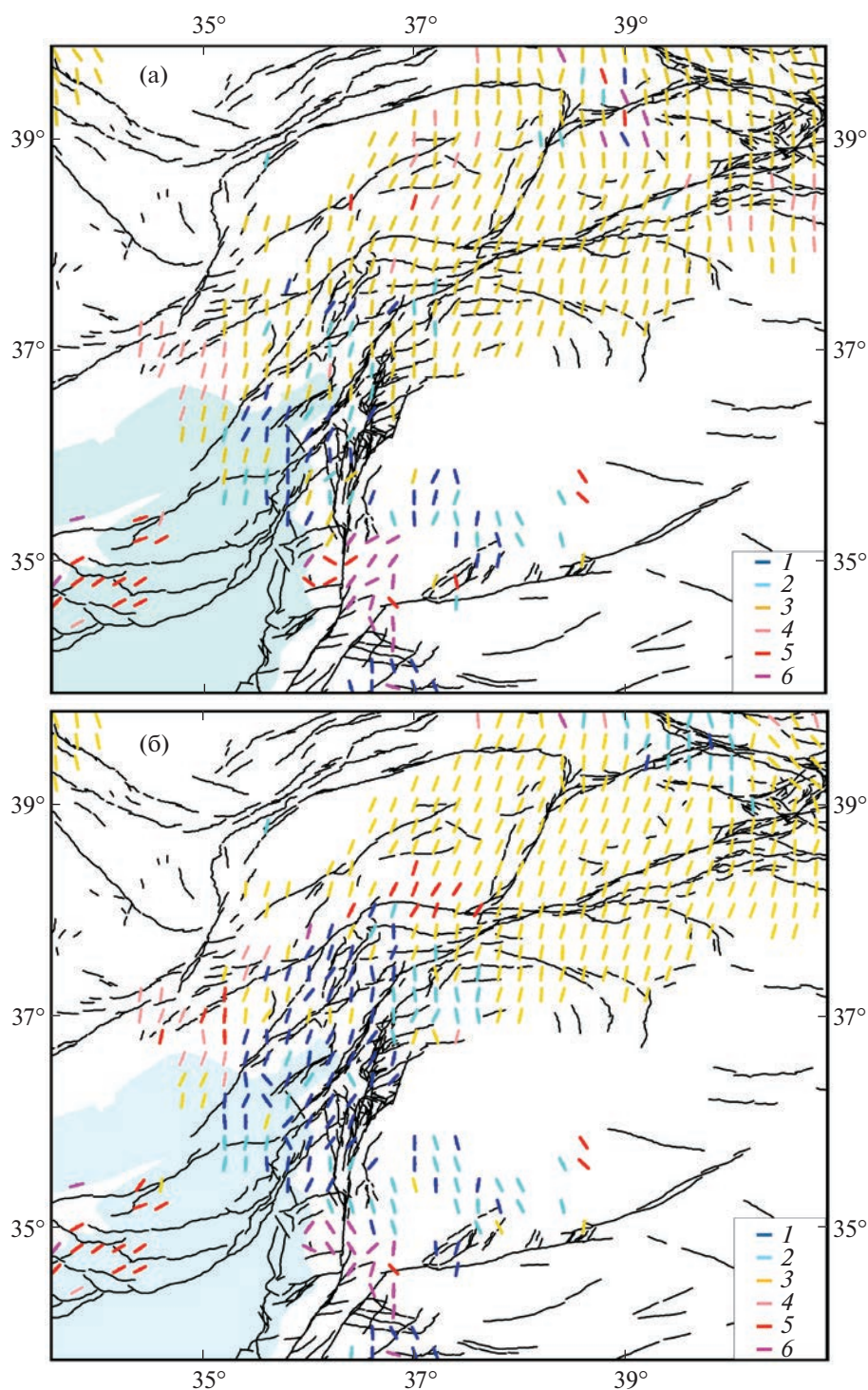


Рис. 4. Ориентация осей напряжений наибольшего горизонтального сжатия и геодинамический тип напряженного состояния для двух стадий расчета напряжений: а) начальная, б) конечная: 1 – горизонтальное растяжение, 2 – транспрессия, 3 – горизонтальный сдвиг, 4 – транспрессия, 5 – горизонтальное сжатие, 6 – вертикальный сдвиг. Положение разломов показано согласно [4].

(ЕАФ), где он сопрягается с Северо-Анатолийским. Наряду с этим расширилась и стала более интенсивной зона горизонтального сжатия в юго-западном секторе ЕАФ, а также возникла новая

зона горизонтального сжатия к югу от эпицентра главного толчка. Новые области горизонтального растяжения и сжатия приурочены к западному борту ЕАФ. Формирование пары областей проти-

воположного режима напряженного состояния может свидетельствовать о произошедших в период реконструкции напряжений левосдвиговых смещений в системе EAF. К таким разломам относится юго-западное окончание EAF. Возможно, что такие движения захватили и разломы Малатийской зоны, ответвляющиеся от EAF в северо-восточном сегменте исследуемого региона.

Данные о напряжениях являются исходными для расчета кулоновых напряжений τ_c , которые согласно геомеханическим критериям хрупкого разрушения горных пород [13] отвечают за близость разломов к критическому состоянию. В рамках МКА [14, 15] имеется возможность получить значения кулоновых напряжений, нормированных на прочность сцепления $\tau_c/\tau_f < 1$. Для расчета кулоновых напряжений на разломе необходимо для каждого участка разлома иметь не только информацию о простирации, но также о направлении и угле погружения разлома. Для разломов используемой базы данных такая информация нами была получена на основе данных о механизмах очагов землетрясений, произошедших на дистанциях менее 50 км от разлома.

Районирование разломов по степени их опасности выполнялось путем разбиения положительных значений нормированных кулоновых напряжений на четыре диапазона: 1) >0.7 , 2) $0.7-0.4$, 3) $0.4-0.1$ 4) от 0.1 до -0.2 , которые нами именуются как высшей опасности, опасный, тревожный и нейтральный соответственно (рис. 5). Последний диапазон изменения кулоновых напряжений (< -0.2) определяется как безопасный. В соответствии с этой градацией при землетрясении для участков разломов будет меняться уровень сброса касательных напряжений, определяющий и удельную плотность высвобождения упругой энергии при землетрясении. Поскольку данные о напряжениях отвечали масштабу усреднения около 60–80 км, то прогнозируемые землетрясения должны отвечать магнитудам не менее 7.0. Магнитуда ожидаемого землетрясения будет определяться общей протяженностью участков разломов с тремя уровнями повышенной степени опасности, внутри которых могут находиться участки нейтральных значений и даже участки малой протяженности с безопасными значениями кулоновых напряжений [15].

Как видно из рис. 5 а более 75% разломов, для которых имеются данные о напряжениях, находятся в безопасном состоянии. При этом для юго-западного сегмента EAF и его ответвлений в северном побережье Восточного Средиземноморья и Сирии соотношение опасных и безопасных разломов приближается к 1 : 1. Зона будущего очага Пазарджикского землетрясения выглядела более опасной для начального периода реконструкции напряжений. К началу 2023 г. протяженность и

интенсивность опасных участков для его северо-восточной части немного снизились, в то время как повысилась опасность юго-западного сегмента (там, где имели места наибольшие амплитуды косейсмических смещений) и систем разломов вблизи эпицентра главного толчка. Можно предположить, что эти изменения кулоновых напряжений были обусловлены лево-сдвиговыми смещениями, которые происходили в интервале времени между двумя представленными на рис. 2 периодами реконструкции.

Закключаем, что положение очага Пазарджикского землетрясения согласуется с данными об опасных участках разломов EAF по результатам тектонофизического районирования. Отметим также, что эпицентр этого землетрясения был расположен на боковой ветви к юго-востоку от окончания EAF. Эти ветви EAF являлись крайне опасными в результате районирования по кулоновым напряжениям. Разломы для Эльбистанского землетрясения имели отрицательные значения нормированных кулоновых напряжений, что говорит о существенном превышении их эффективной прочности над уровнем касательных напряжений, вероятно, связанной с высоким уровнем сжатия, нормального к разрыву. Возникновение здесь второго по силе землетрясения говорит о том, что косейсмические лево-сдвиговые смещения, произошедшие вдоль главного землетрясения, почти мгновенно понизили уровень нормальных к разломам сжимающих напряжений, обеспечив падение прочности на внутриразломных барьерах.

Представленные материалы позволяют сделать следующие выводы.

1. Караманмарашские землетрясения 2023 г. в Турции произошли по сопряженным разломам Восточно-Анатолийской системы. Они заполнили сейсмическую брешь, существовавшую в западном сегменте EAF. Первое сильное землетрясение (Пазарджик, $M_w = 7.8$) произошло в зоне, где существовали локальные участки повышенных кулоновых напряжений.

2. Второе сильное землетрясение (Эльбистан, $M_w = 7.7$) произошло в зоне, которая до главного толчка характеризовалась низкими значениями кулоновых напряжений, т.е. согласно тектонофизическим представлениям, она была безопасной. Это дает основания полагать, что главный толчок почти мгновенно значительно изменил напряженно-деформированное состояние в окрестностях своего очага, что привело к возникновению второго сильного землетрясения. Возможность существования практически мгновенного изменения напряженно-деформированного состояния в системе сопряженных разломов может изменить подходы к оценке сейсмической опасности.

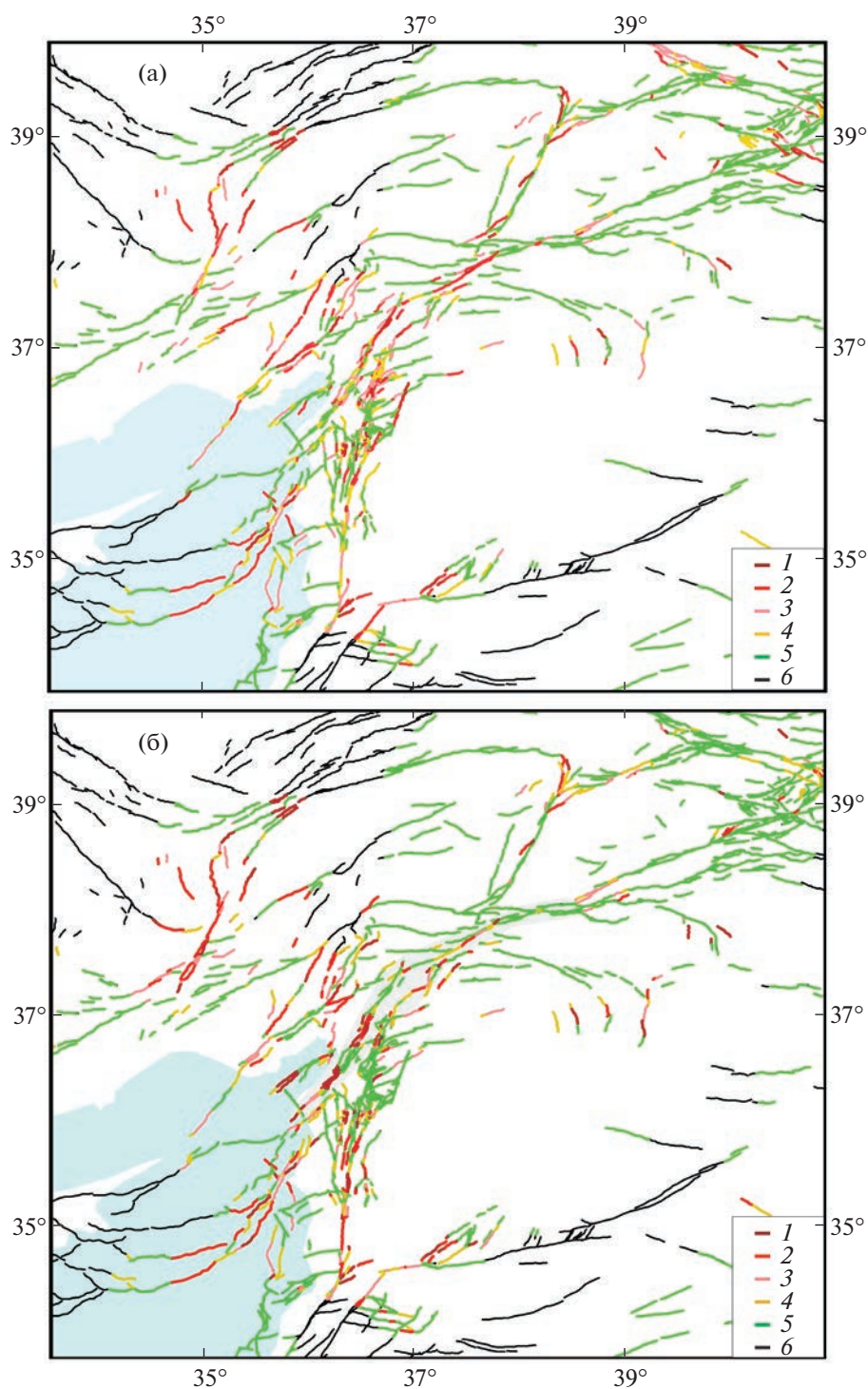


Рис. 5. Районирование для двух стадий расчета напряженного состояния: а) начальная, б) конечная — участков активных разломов из базы данных по уровню кулоновых напряжений: 1 — высшая опасность, 2 — опасный, 3 — тревожный, 4 — нейтральный, 5 — безопасный, 6 — участки разломов, для которых отсутствовали данные о напряжениях. Светло-серым цветом выделена зона очага Пазарджикского землетрясения.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН и проекта РНФ 22-27-00591 “Развитие методов тектоно-физического районирования активных разломов земной коры”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Båth M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // *Tectonophysics*. 1965. 2 (6). P. 483–514.
2. *Özacar A.A., Uzel B., Bozkurt B., Sançar T., Sopacı E., Kaymakçı N., Rojay B., Gülerce Z., Kınal C., Gregory L.* Regional Tectonics and Seismic Source. / Preliminary Reconnaissance Report on February 6, 2023 Kahramanmaraş-Pazarcık ($M_w = 7.7$) and Elbistan ($M_w = 7.6$) Earthquakes. Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Ankara, 2023.
3. *Utkusu M., Uzuncha F., Durmuş H., Nalbant S., Sert S.* The 2023 Pazarcık ($M_w = 7.8$) and Elbistan ($M_w = 7.6$), Kahramanmaraş earthquakes in the Southeast Türkiye. Sakarya University, Disaster Management Application and Research Center. Sakarya, 22.02.2023.
4. *Бачманов Д.М., Кожурин А.И., Трифонов В.Г.* База данных активных разломов Евразии // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 4. С. 711–736.
5. Global CMT, 2023 (<http://www.globalcmt.org>), скачан в 2023.
6. International Seismological Centre (2023), ISC-GEM Earthquake Catalogue. <https://doi.org/10.31905/d808b825>
7. *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.
8. *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.
9. *Трифонов В.Г.* Неотектоника подвижных поясов. М.: ГЕОС. 2017. 180 с.
10. *Esat K., Seyitoğlu G.* Surface rupture map of the 2023.02.06 Kahramanmaraş Earthquakes based on high-resolution satellite and aerial imagery. Report of tectonics Research Group, Dept. of Geological Engineering, Ankara University, 06.03.2023.
11. *Reitman N.G., Briggs R.W., Barnhart W.D., Thompson J.A., DuRoss C.B., Hatem A.E., Gold R.D., Mejstrik J.D., Akçiz S.* Preliminary fault rupture mapping of the 2023 M7.8 and M7.5 Türkiye earthquakes. USGS, 28.02.2023. <https://doi.org/10.5066/P985I7U2>
12. *Ребецкий Ю.Л.* Методы реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций на основе современной теории пластичности // *ДАН*. 1999. Т. 365. № 3. С. 392–395.
13. *Ребецкий Ю.Л.* Развитие метода катакластического анализа сколов для оценки величин тектонических напряжений // *ДАН*. 2003. Т. 400. № 3. С. 237–241.
14. *Ребецкий Ю.Л., Кузиков С.И.* Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня // *Геология и геофизика*. 2016. Т. 57. № 6. С. 1225–1250.
15. *Ребецкий Ю.Л., Guo Y., Wang K., Алексеев Р.С., Маринин А.В.* Напряженное состояние земной коры и сейсмотектоника Западного Сычуаня, Китай // *Геотектоника*. 2021. № 6. С. 75–97.

KAHRAMANMARASH EARTHQUAKES IN TURKEY: SEISMIC MOTION ALONG CONJUGATED FAULTS

Corresponding Member of the RAS S. A. Tikhotsky^{a, #}, R. E. Tatevosyan^a, Yu. L. Rebetsky^a,
A. N. Ovsyuchenko^a, and A. S. Larkov^a

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#]*E-mail: direction@ifz.ru*

Earthquakes in Turkey (Karamanmarash province) in February 2023 do not fit into the usual sequence: the main shock is aftershocks. According to Botha's statistical law [1], the magnitude of the strongest aftershock is expected to be one less than the magnitude of the main shock. Meanwhile, for the aftershock sequence in Turkey, this difference is only 0.1. In Turkish publications, the first of the strongest earthquakes is called Pazarcık ($M_w = 7.8$), and the second – Elbistan ($M_w = 7.7$) [2, 3]. Each of these earthquakes generated its own system of surface ruptures and aftershock sequences differently oriented in space. The purpose of the study is to assess whether the occurrence of the second earthquake is due to the stress field that existed earlier, or whether it arose as a result of the main shock. If the second scenario is implemented, this means that the stress field can change in the vicinity of a strong earthquake almost instantly (the time difference between earthquakes is less than 9 hours).

Keywords: earthquake, seismic source, seismology, tectonophysics, seismotectonics, active faults, Turkey, Karamanmarash