

УДК 528.01/.06:550.348.436(560)
DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-51-60

О геодезических измерениях для определения смещений и деформаций в эпоху землетрясений в Турции 06.02.2023 г.

В. Ю. Тимофеев¹✉, Д. Г. Ардюков¹, А. В. Тимофеев¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Сейсмическая активность в Турции 6 февраля 2023 г. началась с двух сильных землетрясений магнитудой более 7,5, а далее, в области Восточно-Анатолийского разлома, на протяжении нескольких дней зарегистрировано большое количество событий магнитудой от 4 до 6. Впоследствии, в зоне землетрясений наблюдались разрывы земной поверхности, смещения, обвалы горных пород, оползни и опускания грунта. Измерения последствий землетрясения проводились различными геодезическими методами – от классического нивелирования до методов космической геодезии. Зарегистрированная протяженность сейсмического разрыва на земной поверхности составляла 300 км. Величина смещений по разрывам в эпицентре достигала 6 м. Поле смещений анализировалось в ближней и дальней зоне землетрясений. В ближней зоне применялось нивелирование, GPS-метод по локальной сети и метод спутниковой радарной съемки. Результаты измерений соответствуют модельным расчетам и сейсмологическим данным. В анализе смещений в дальней зоне использованы материалы измерений методом космической геодезии по данным международной сети IGS. Даже в 300 км от эпицентра смещения составляют 20 мм. Косейсмические деформации в дальней зоне достигают 10^{-8} , что на порядок выше фоновых значений 10^{-9} . Результаты пространственного распределения скорости смещений в дальней зоне показали сложную картину, что может быть следствием конфигурации разломной сети и положением станций измерений. Косейсмические горизонтальные смещения и опускания земной поверхности вызвали наводнения в районах Турции, расположенных к юго-западу от эпицентров землетрясений 6 февраля 2023 г. Проведено исследование смещений и деформации территории Турции и её окружения в эпохи с 2017 по 2023 г. Выделено затухание смещений за два года до сейсмической активизации 2023 г.

Ключевые слова: смещения, деформации, геодезические методы, землетрясения, моделирование.

Для цитирования:

Тимофеев В. Ю., Ардюков Д. Г., Тимофеев А. В. О геодезических измерениях для определения смещений и деформаций в эпоху землетрясений в Турции 06.02.2023 г. // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 51–60. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-51-60

Введение

Землетрясения в Турции магнитудой до 7,8 случились 06.02.2023 г. на восточной границе Анатолийского блока в зоне влияния Евразийской, Аравийской и Африканской тектонических плит (рис. 1). Именно на краях плит геологические структуры Земли подвергаются наибольшему воздействию

сил, возникающих в результате движения и столкновения плит, и именно там происходят самые крупные геологические преобразования, в том числе – землетрясения. Сильные землетрясения известны катастрофическими смещениями и разрывами, трансформируемыми на земной поверхности. Из-за масштабных катастрофических разрушений жилых зданий и сооружений событие

06.02.2023 г. признано одним из самых катастрофических с начала XXI в., число погиб-

ших и раненых превысило 160 000, разрушено более 164 тысяч зданий [1].

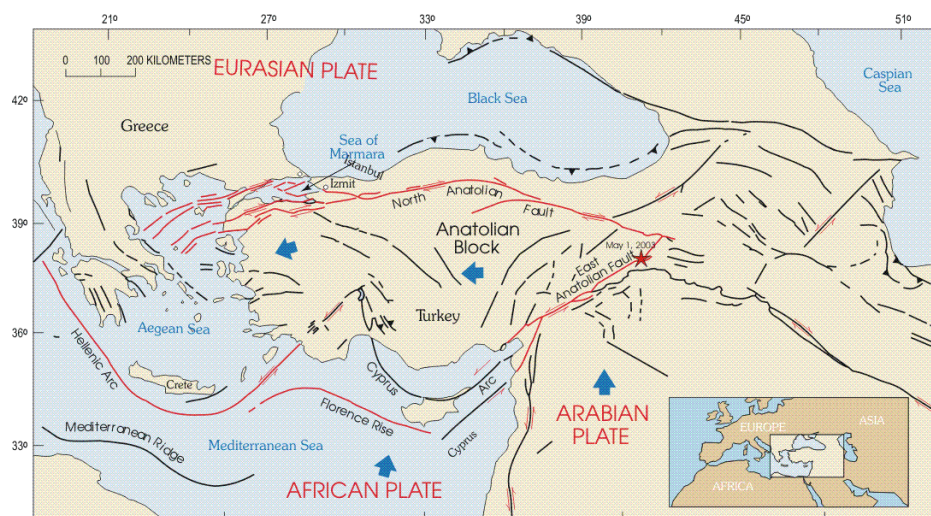


Рис. 1. Карта района исследований [2], включающая Анатолийский блок (Anatolian Block), ограниченный с севера Северо-Анатолийским разломом (North Anatolian Fault), с востока – Восточно-Анатолийским разломом (East Anatolian Fault).

На карте района исследований (см. рис. 1) звездой обозначен эпицентр первого землетрясения 06.02.2023 г. Стрелками показано направления смещения тектонических плит (Африканской – AFRICAN, Аравийской – ARABIAN и Анатолийского блока) относительно Евразийской плиты – EURASIAN PLATE. Скорость смещения Анатолийского блока составляет 9–10 мм в год [2].

Задача нашей работы – анализ полей смещений и деформации земной поверхности в эпоху землетрясений в Турции в феврале 2023 г., полученных с использованием геодезических методов – от наземных до спутниковых, в эпицентральной зоне и на всей территории Турции и её окружении.

Методика исследований

Параметры землетрясений определялись в различных сейсмологических центрах мира. Один из вариантов расчётов приведен в табл. 1. Результаты определения в различных сейсмологических центрах показывают левостороннее сдвиговое смещение на практически вертикальных сейсмических разрывах, для первого землетрясения диапазон глубин состав-

ляет от 10 до 32 км, а магнитуд – от 7,7 до 8,0. Для второго землетрясения получены оценки глубины от 7 км до 15 км, а для магнитуды – от 7,5 до 7,8.

Таблица 1

Параметры двух сильнейших землетрясений в Турции 06.02.2023 г. [1]

Время (UT)	Магнитуда	Широта, °N	Долгота, °E	Место
1:17:35	7,8	37.174	37.032	33 км западнее Газиантепа
10:24:49	7,5	38.008	37.211	4 км восточнее Экинезю

Большой объём измерений методом нивелирования проведен по сейсмическому разрыву первого землетрясения. Положение и нумерация пунктов измерения последствий первого землетрясения 06.02.2024 г. на разломе EAFZ и на северных окончаниях разлома DST приведены на рис. 2. Локальная GPS сеть и результаты определений смещений приведены на рис. 3.

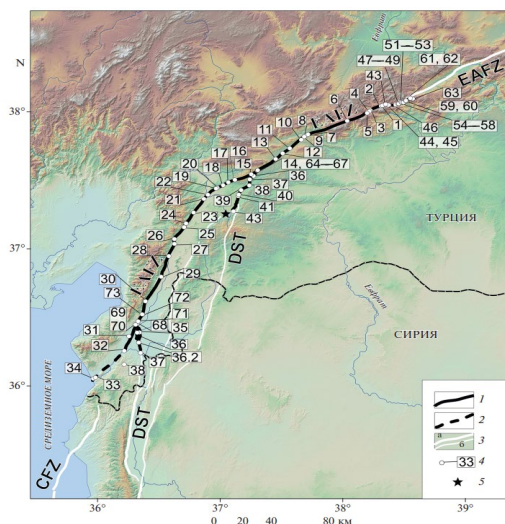


Рис. 2. Положение сейсмического разрыва и нумерация пунктов.

Обозначение разломов: EAFZ- Восточно-Анатолийская Разломная Зона; DST – Трансформа Мёртвого моря; 1-2 – активизированная часть EAFZ и DST: 1 – с горизонтальными левосторонними сдвигами; 2 – без горизонтальных смещений; 3 – не активизированные участки разломов: а – главные, б – второстепенные; 4 – точки наблюдений; 5 – эпицентр первого землетрясения 06.02.2024 г. [3]

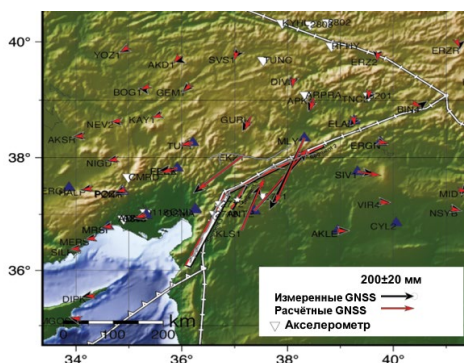


Рис. 3. Положение пунктов локальной GPS сети и значения смещений при первом землетрясении [1]

Для изучения смещений использовались методы радарной съемки различных модификаций с применением разных методов обработки снимков спутника Сентинель-1А от 28.01.2023 и от 09.02.2023 [4].

При анализе пространственного распределения смещений использованы данные по 27 постоянным GPS-пунктам международной сети IGS [5]. Обработка материалов измерений проводилась программными пакетами, наиболее распространенными в работе международных научных центров: GAMIT-GLOBK [6]. Расчет плитных скоростей выполнялся в рамках модели ITRF-2014 [7, 8].

Так, решения для станции ZECK (станция Зеленчукская, Северный Кавказ), находящейся на Евразийской плите, скорости за период 2017–2023 гг. (эпоха – 11 дней в феврале) составили $11,54 \pm 0,14$ мм/год на север, $25,11 \pm 0,20$ мм/год на восток (координаты станций в табл. 2). Для станции Новосибирск (Ключи, NVSK), расположенной на самом северном краю использованной сети, скорость смещения по определениям за период 2017–2023 гг. составляет $-1,04$ мм/год и $26,68$ мм/год, при ошибке $0,3$ мм, что соответствует модели ITRF-2014 для Евразии $(-0,63; 26,4)$.

Координаты станций, данные которых использованы в работе

Код	Широта, ° N	Долгота, ° E
ZECK Зеленчукская, Северный Кавказ, Россия	43.78839	41.56507
DYNG Афины, Греция	38.07855	23.93244
ISBA Багдад, Ирак	33.34142	44.43841
ISTA Стамбул, Турция	41.10445	29.01935
KABR Хайфа, Израиль	33.02282	35.14506
MERS Мерсин, Турция	36.56639	34.25585
MIKL Николаев, Украина	46.97279	31.97285
NICO Никосия, Кипр	35.14099	33.39645
SOFI София, Болгария	42.55610	23.39474
ARUC Ереван, Армения	40.28572	44.08559
BUCU Бухарест, Румыния	44.46395	26.12575
TUBI Измит, Турция	40.78672	29.45068
IZMI Измир, Турция	38.39480	27.08182
NVSK Новосибирск, Ключи, Россия	54.8401	83.2352

Определение скорости деформаций по сети треугольников проводилось методом триангуляции Делоне [9]. Остановимся на анализе данных по эпицентральной части сильнейших землетрясений, случившихся 06.02.2023.

Смещения, зарегистрированные в ближней зоне

В результате первого землетрясения поверхностный разрыв распространился на 300 км (рис. 2), а максимальные смещения достигали 8,5 м [3]. При втором землетрясении разрыв протянулся на 130 км, а максимальные сдвиги достигали 6 м. По данным измерений на 62 пунктах получен график смещений (рис. 4). Среднее значение смещения по активированной части разлома EAFZ (см. рис. 2) составляет 3,6 м.

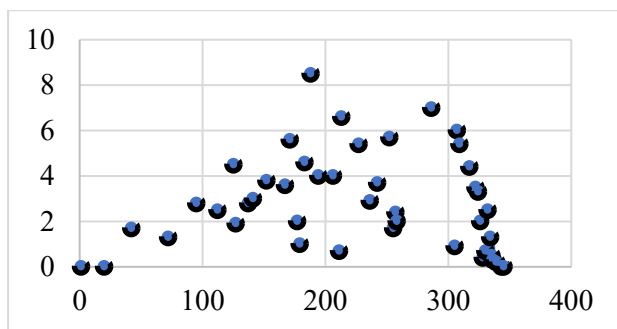


Рис. 4. Распределение амплитуд левосторонних смещений (в метрах) при сдвиге вдоль активированной части разлома EAFZ (в километрах)

Данные локальных сетей GPS (см. рис. 3) в обоих случаях показывают левостороннее смещение вдоль сейсмических разрывов, хотя из-за геометрии разломов на земной поверхности картина достаточно сложна. Используя GPS-данные локальной сети (см. рис. 3: MLY1(0,43 м), EKZ1 (0,27 м), GUR1 (0,07), AKD1(0,30 м)) в рамках дислокационной модели землетрясения, получено достаточно простое распределение левосторонних горизонтальных смещений с расстоянием от разлома (см. рис. 4). Смещения в дальней зоне хорошо соответствуют простейшей модели горизонтального сдвига в центральной части сейсмического разрыва при первом землетрясении 06.02.2023 г. и позволяют уточнить глубину.

Для построения теоретической кривой, приведенной на рис. 5, использовано соотношение для смещений в зоне сдвига на вертикальном разрыве [10]:

$$\Delta w(x) \equiv w(x) - w_0(x) = \left(\frac{\Delta w_0}{2}\right) \left[\left(\frac{1+x}{a} \right) - \frac{x}{a} \right] \operatorname{sgn} x,$$

где $\Delta w(x)$ – смещение в точке на расстоянии x ; Δw_0 – относительное смещение по разрыву; x – расстояние от линии сейсмического разрыва; a – глубина. Используются параметры: глубина разрыва – 10 км, относительное смещение – 4 м. Точки на рис. 5 – это измеренные значения смещений на разных расстояниях ортогонально линии разрыва.

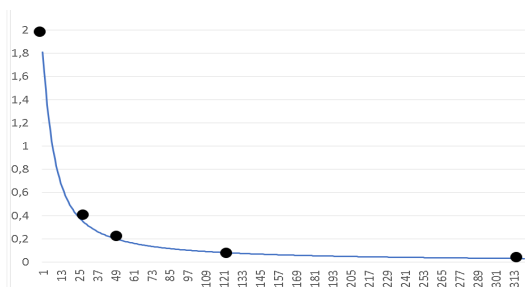


Рис. 5. Изменение смещений (в метрах) в зависимости от расстояния до разрыва (в километрах) для первого сильного землетрясения 06.02.2023 г.

Из результатов радарной съёмки (рис. 6) следует, что смещениям более 1 м подверглась значительная часть Восточной Турции, а максимальные сдвиги (до 5 м) произошли на центральном и северном участках EAFZ. Следует заметить, что результаты отражают все смещения за период с 28.01.2023 г. по 09.02.2023 г., включая произошедшие в период съёмки обвалы и оползни. Отметим, что землетрясения достаточно уникальны, так как сейсмические разрывы выходят на поверхность и их можно измерить.

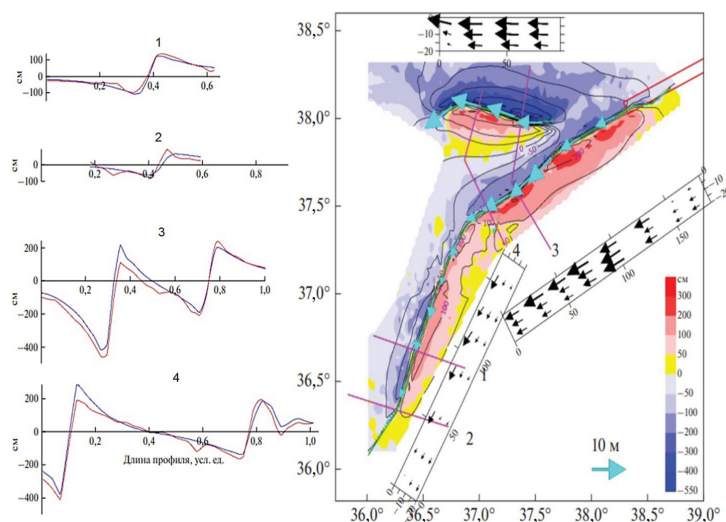


Рис. 6. Модель поверхности разрыва для землетрясений 06.02.2023, построенная по данным радарной интерферометрии

На цветной карте (см. рис. 6) представлены смещения земной поверхности в сантиметрах, определенные по данным радарной съёмки, черные изолинии – модельные результаты. В черных прямоугольниках – вертикальный разрез зоны разрыва, глубина в километрах, а стрелками показаны смещения, убывающие с глубиной; 1, 2, 3, 4 – линии профилей. Слева на рисунке – горизонтальные смещения по профилям. Красные линии – экспериментальные данные, а синие линии – результаты, составленные по модельным расчётам [4].

В целом получено сдвиговое левостороннее смещение по региональным разломам, что соответствует геодезическим наземным измерениям и данным, полученным спутниковыми методами. Рассмотрим далее расп-

ределение косейсмических смещений в дальней зоне на территории Турции и её окружения.

Пространственное распределение смещений, обсуждение результатов

В дальней зоне, наиболее близкой к будущему эпицентру землетрясений 06.02.2023 г., оказалась станция MERS (265 км, см. табл. 2). Был проведен анализ смещений станции за период с 2017 по 2023 г. (в эпоху 1–11 февраля). По ежегодным определениям, после исключения линейного тренда, получены следующие графики смещений пункта по трем координатам, соответственно, (сверху вниз на рис. 7, а) по широте, долготе и вертикали.

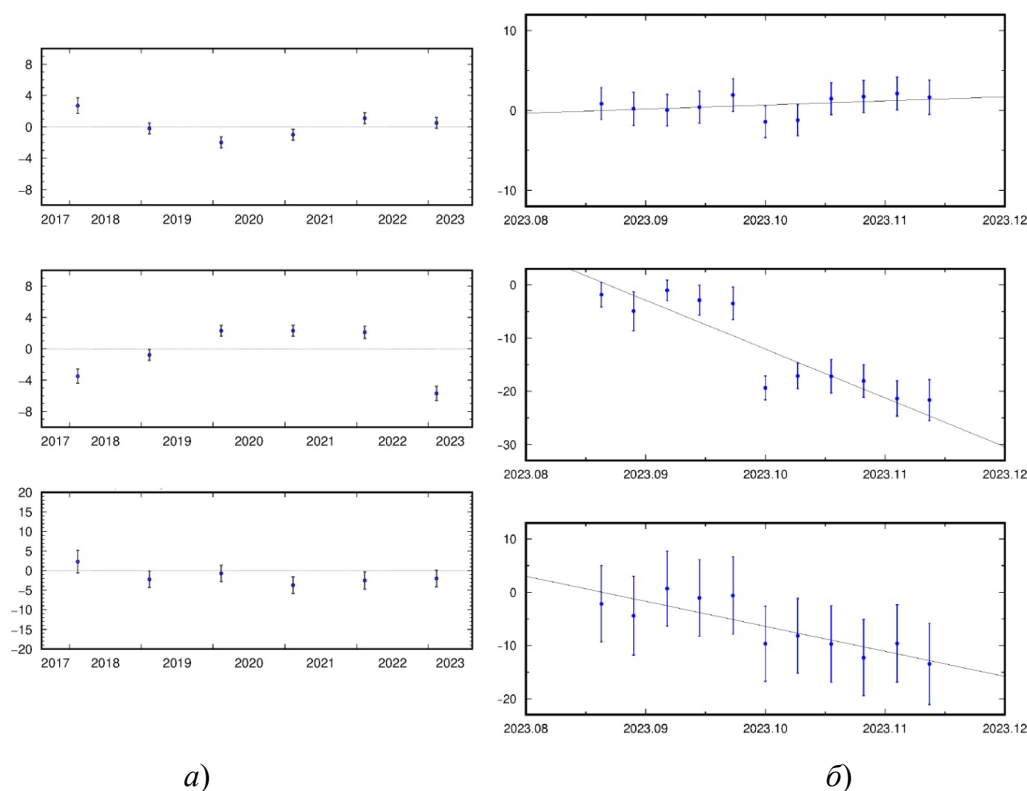


Рис.7. Графики 3D-смещений пункта MERS в разные эпохи. Вертикальная шкала в мм, горизонтальная – время

Величины линейной скорости составляли: $16,08 \pm 0,19$ мм/год на север, $12,39 \pm 0,21$ мм/год на восток, по вертикали $-0,58 \pm 0,56$ мм/год. Обращаясь к результатам анализа смещений начиная с 2017 г., можно отметить аномальное замедление смещений с 2021 г. по горизонтальным компонентам перед событиями февраля 2023 г. (см. рис. 7 а).

Для эпохи землетрясений на рис. 7, б приведены вариации смещений пункта MERS по ежедневным определениям на период с 1 по 11 февраля 2023 г. Выделяется смещение пункта 06.02.2023 г. на 25 мм на ЮЗЗ. Подобные смещения отмечаются ещё на нескольких станциях дальней зоны. После землетрясения зарегистрировано опускание земной поверхности на 10 мм.

Для определения скоростей современных смещений и координат пунктов периодических повторных измерений нами выполнялось сетевое относительное уравнивание, реализованное в программном пакете GAMIT/GLOBK [6] на 27 пунктах международной GPS-сети. Расчёт деформаций выполнялся с использо-

ванием покрытия исследуемой территории конечным набором треугольных элементов, а с помощью алгоритма Делоне, реализованного в программном наборе инструментов [11, 12], определялись компоненты деформации. Рассматривая результаты определения различных характеристик скорости деформации территории, отметим, что наиболее информативными оказались площадная и сдвиговые деформации. Скорость площадной деформации треугольников ISTA-ZECK-MERS и ZECK-MERS-ARUC, охватывающих восточную часть Турции, часть акватории Чёрного моря и западную часть Кавказа, от практически нулевой, в начале февраля 2023 г., сменилась растяжением -10^{-8} в конце декады. На рис. 8, 9 приведены результаты определения скорости площадной деформации в 10^{-6} /год, а звёздочками показаны эпицентры землетрясений. Анализ изменений скорости сдвиговой деформации до и после события показал, что величина скорости сдвига увеличилась в два раза (от $4 \cdot 10^{-8}$ /год до 10^{-7} /год). Максимальные измерения отмечаются в западной части Турции.

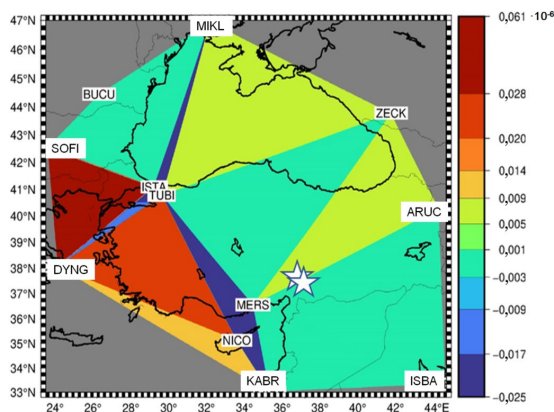


Рис. 8. Результаты определения скорости площадной деформаций 04.02.2023 г.

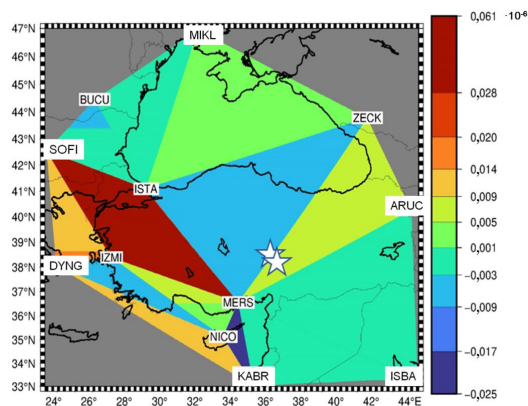


Рис. 9. Результаты определения скорости площадной деформаций 08.02.2023 года

Анализ результатов позволяет выделить аномалию в скорости смещения пунктов к юго-западу от эпицентров (рис. 9). Как отмечено выше, здесь, на пункте MERS после землетрясения зарегистрировано опускание (см. рис. 7, б),

а далее, в марте, улицы турецкого г. Искендеруна в провинции Хатай оказались под водой в результате резкого подъема уровня моря, на улицах города глубина местами достигала 60–80 см (рис. 10).

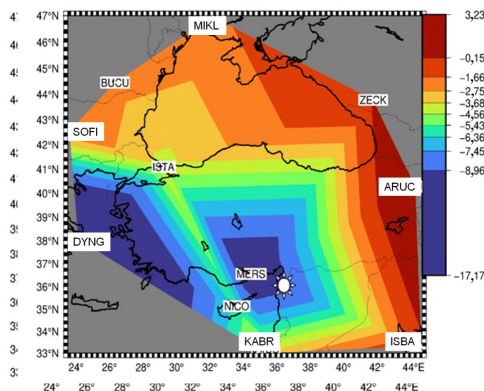


Рис. 10. Распределение скорости смещения на восток в мм/год по определениям 11.02.2023 г. Аномалия проявляется в районе городов Мерсина (MERS) и Искендеруна (*). Положение эпицентров землетрясений отмечено звездочками

Заключение

Геодезические методы при изучении последствий сильных землетрясений позволяют оценить величину и пространственное распределение смещений и деформаций, выделять сейсмические эффекты с высокой точностью и с ошибками порядка нескольких миллиметров. Величина смещений по разрывам в эпицентре землетрясений 06.02.2023 г. в Турции достигала 6 метров. Поле смещений проанализировано в ближней и дальней зоне землетрясений. В ближней зоне применялось нивелирование, GPS-метод по локальной сети и метод спутниковой радарной съёмки.

Результаты измерений соответствуют модельным расчетам и сейсмологическим данным. В анализе смещений в дальней зоне использованы данные космической геодезии по международной сети IGS. Косейсмические деформации в дальней зоне достигают 10^{-8} , что на порядок выше фоновых значений 10^{-9} . Опускание земной поверхности к юго-западу от эпицентральной зоны стало причиной наводнения в районе г. Искендерун. Из анализа данных 2017–2023 гг. выделено затухание горизонтальных смещений за два года до сейсмической активизации 06.02.2023 г.

Работа выполнена в рамках проекта НИР ИНГГ СО РАН, номер FWZZ-2022-0019.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M. T., Braitenberg C., Gurbuz G. Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone // *Seismica*. – 2023. – Vol. 2, No. 3. – DOI 10.26443/seismica.v2i3.502.
2. Holzer T. L. Implications for earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999. US Government Printing Office. – 2000. – Vol. 1193. – pp. 9.
3. Челик Х., Трихунков Я. И., Соколов С. А., Трифионов В. Г., Зеленин Е. А., Каргиноглу Ю., Юшин К. И., Ломов В. С., Бачманов Д. М. Тектонические аспекты Восточно-Анатолийского землетрясения 06.02.2023 г. в Турции // *Физика Земли*. – 2023. – № 6. – С. 5–23.
4. Михайлов В. О., Бабаянц И. П., Волкова М. С., Тимошкина Е. П., Смирнов В. Б., Тихоцкий С. А. Реконструкция косейсмических и постсейсмических процессов для землетрясения в Турции 06.02.2023 г. по данным радарной спутниковой интерферометрии // *Физика Земли*. – 2023. – № 6. – С. 77–88.
5. Сеть IGS [Electronic resource]. – URL: <https://network.igs.org/>.
6. Herring T. A., King R. W., McClusky S. C. Introduction to GAMIT-GLOBK. – Cambridge, Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology – 2010.
7. Altamimi Z. P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*. – 2016. – Vol. 121. – P. 6109–6131. – DOI 10.1002/2016JB013098.
8. Altamimi Z. et al. ITRF2014 plate motion model // *Geophysical Journal International*. – 2017. – Vol. 209, No. 3. – P. 1906–1912.
9. Burgette R., McClusky S. C., Lejeune S., Watson C. S., McQueen H. A decade of horizontal deformation from great earthquakes // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. – 2013. – Vol. 118. – P. 2371–2381. – DOI 10.1002/jgrb.50154.
10. Turcotte D. L., Schubert G. *Geodynamics: Application of Continuum Physics to Geological Problems*. – New York: John Wiley & Sons – 1982. – 464 p.
11. Wessel P. et al. The generic mapping tools, version 6 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2019. – P. 5556–5564.
12. Teza G., Pesci A., Galgaro A. Grid-strain and grid-strain3: software packages for strain field computation in 2D and 3D environment // *Computers & Geosciences*. – 2008. – Vol. 34 (9). – P. 1142–1153. – DOI 10.1016/j.cageo.2007.07.006.

Об авторах

Владимир Юрьевич Тимофеев – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник.

Дмитрий Геннадьевич Ардюков – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Антон Владимирович Тимофеев – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, зав. лабораторией.

Получено: 12.03.2024

© В. Ю. Тимофеев, Д. Г. Ардюков, А. В. Тимофеев

On geodetic measurements to determine displacements and deformations after earthquakes in Turkey on 02/06/2023

V. Y. Timofeev¹✉, D. G. Ardyukov¹, A. V. Timofeev¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: timofeevvy@ipgg.sbras.ru

Abstract. Seismic activity in Turkey on February 6, 2023 began with two strong earthquakes with a magnitude of more than 7.5, and then, in the area of the East Anatolian Fault, a large number of events with magnitudes from 4 to 6 were recorded over several days. Subsequently, ruptures of the earth's surface were observed in the earthquake zone, displacements, rock falls, landslides and ground subsidence. Measurements of the consequences of the earthquake were carried out using various geodetic methods, from classical leveling to space geodesy methods. The recorded length of the seismic rupture on the earth's surface was 300 km. The magnitude of the displacements along the ruptures at the epicenter reached 6 meters. The displacement field was analyzed in the near and far zones of earthquakes. In the near zone, leveling, the GPS method over a local network and the satellite radar survey method were used. The measurement results correspond to model calculations and seismological data. The analysis of displacements in the far zone uses materials from measurements using the space geodesy method based on data from the international IGS network. Even 300 km from the epicenter, the displacements are 20 mm. Coseismic deformations in the far zone reach 10⁻⁸, which is an order of magnitude higher than the background values of 10⁻⁹. The results of the spatial distribution of displacement rates in the far zone showed a complex picture, which may be a consequence of the fault network configuration and the measurement stations position. Coseismic horizontal displacements and subsidence of the earth's surface caused floods in areas of Turkey located to the southwest of the epicenters of the earthquakes on February 6, 2023. A study of displacements and deformations of the territory of Turkey and its surroundings was carried out in the eras from 2017 to 2023. The attenuation of displacements two years before the seismic activation in 2023 is highlighted.

Keywords: displacements, deformations, geodetic methods, earthquakes, modeling

REFERENCES

1. Barbot, S., Luo, H., Wang, T., Hamiel, Y., Piatibratova, O., Javed, M. T., Braitenberg, C., & Gurbuz, G. (2023) Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone. *Seysmika [Seismica]*, Vol. 2, No 3., DOI 10.26443/seismica.v2i3.502.

2. Holzer, T. L. (2000). Implications for earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999. *Tipografiya pravitel'stva USA [US Government Printing Office]*, Vol. 1193, P.9. Retrieved from <https://pubs.usgs.gov/circ/2000/1193/report.pdf>.
3. Celik, H., Trikhunkov, Y. I., Sokolov, S. A., Trifonov, V. G., Zelenin, E. A., Karginoğlu, Y., Yushin, K. I., Lomovb, V. S., & Bachmanov, D. M. (2023). Tectonic Aspects of the East Anatolian 06.02.2023 Earthquake in Turkey. *Izvestiya, Fizika tverdogo tela Zemli [Izvestiya, Physics of the Solid Earth]*, No 6, P. 5–23.
4. Mikhailov, V. O., Babayants, I. P., Volkova, M. S., Timoshkina, E. P., Smirnov, V. B., & Tikhotsky, S. A. (2023). Reconstruction of Co-Seismic and Post-Seismic Processes for the February 6, 2023 Earthquake in Turkey from Data of Satellite SAR Interferometry. *Izvestiya, Fizika tverdogo tela Zemli [Izvestiya, Physics of the Solid Earth]*, No 6, P. 77–88.
5. IGS net Retrieved from <https://network.igs.org/>.
6. Herring, T. A., King, R. W., & McClusky S. C. (2010). Introduction to GAMIT-GLOBK. *Massachusettskiy Institut Tekhnologiy [Massachusetts Institute of Technology]*, Cambridge, Massachusetts.
7. Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L., & Collilieux. X. (2016). ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *Dzh. Geofiz. Rez. Tverdaya Zemlya [J. Geophys. Res. Solid Earth]*, 121, P. 6109–6131. DOI: 10.1002/2016JB013098.
8. Altamimi, Z., & et al. (2017). ITRF2014 plate motion model. *Mezhdunarodnyy geofizicheskiy zhurnal [Geophysical Journal International]*. 209, No. 3, C. 1906-1912.
9. Burgette, R., McClusky, S. C., Lejeune, S., Watson, C. S., & McQueen, H. (2013). A decade of horizontal deformation from great earthquakes. *Zhurnal geofizicheskikh issledovaniy: Solid Earth [Journal of Geophysical Research: Solid Earth]*. 118, P. 2371-2381. DOI 10.1002/jgrb.50154.
10. Turcotte, D.L., & Schubert, G. (1982). Geodynamics: Application of Continuum Physics to Geological Problems. *Dzhon Uayli i synov'ya [John Wiley & Sons]*, New York, 464 p.
11. Wessel, P., & et al. (2019). The generic mapping tools, version 6. *Geokhimiya, geofizika, geosistemy [Geochemistry, Geophysics, Geosystems]*, P. 5556-5564.
12. Teza, G., Pesci, A., & Galgaro, A. (2008). Grid-strain and grid-strain3: software packages for strain field computation in 2D and 3D environment. *Komp'yutery i geonauki [Computers & Geosciences]*, 34 (9), P.1142-1153. DOI 10.1016/j.cageo.2007.07.006.

Author details

Vladimir Ju. Timofeev – D. Sc., Chief Researcher.

Dmitriy G. Ardyukov – Ph. D., Senior Researcher.

Anton V. Timofeev – Ph. D., Chief of Laboratory, Senior Researcher.

Received 12.03.2024

© V. Y. Timofeev, D. G. Ardyukov, A. V. Timofeev, 2024