



## ДЕФОРМАЦИИ И СМЕЩЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ЭПОХУ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ТУРЦИИ В ФЕВРАЛЕ 2023 ГОДА ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Владимир Юрьевич Тимофеев<sup>1,✉</sup>, Дмитрий Геннадьевич Ардюков<sup>2</sup>, Антон Владимирович Тимофеев<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Коптюга, 3, Россия,

<sup>1</sup>TimofeevVY@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6029-7801>

<sup>2</sup>ArdukovDG@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3089-7114>

<sup>3</sup>TimofeevAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7664-7244>

**Аннотация.** Проводится анализ связи серии Турецких землетрясениях февраля 2023 г. и косейсмических смещений и деформаций земной поверхности. В области сейсмического разрыва за пять дней зарегистрированы три землетрясения 6 февраля  $M = 7.8, 6.7, 7.5$  и далее в течение 5 дней 42 события  $M = 4.5–6.0$ . Проанализированы данные, полученные различными методами геодезии в эпицентральной области. Рассматриваются косейсмические эффекты в 300-километровой зоне, охватывающей значительную часть Восточно-Анатолийского разлома. Здесь зарегистрированы относительные смещения до 6 м, при среднем значении 4 м. При изучении эффектов в дальней зоне использованы данные по GPS сети из 27 международных станций, из них семь станций расположены на территории Турции. Для наиболее близкой к очагу главного толчка 6 февраля 2023 г. станции MERS получены косейсмические 3D смещения величиной до 20 мм. Выполнено построение полей смещений и деформаций по данным сети IGS. Скорости косейсмических деформаций в дальней зоне достигают  $10^{-8}$ , что на порядок выше фоновых значений  $10^{-9}$ . Постсейсмические горизонтальные и вертикальные скорости смещений земной поверхности в районах Турции, расположенных к юго-западу от эпицентров землетрясений, можно связать с наводнениями. Проведено исследование смещений и деформации территории Турции и ее окружения в эпоху 2017–2023 гг. Выделено уменьшение скорости смещений за два года до сейсмической активизации 2023 г. Полученная картина скоростей смещений и деформаций отражает современные процессы на территории, расположенной на границах Анатолийского блока и тектонических плит: Евразийской, Аравийской и Африканской.

**Ключевые слова:** деформации, смещения, геодезические методы, Турецкие землетрясения, Анатолийские разломы, тектонические плиты

**Финансирование:** работа выполнена в рамках проекта ФНИ FWZZ-2022-0019.

**Для цитирования:** Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В. Деформации и смещения земной поверхности в эпоху землетрясений в Турции в феврале 2023 года по геодезическим данным // Геофизические технологии. 2024. № 2. С. 55–72. doi:10.18303/2619-1563-2024-2-55.

## DEFORMATION AND DISPLACEMENTS OF EARTH'S SURFACE IN TURKISH EARTHQUAKES ERA IN FEBRUARY 2023 BY GEODESY DATA

Vladimir Yu. Timofeev<sup>1,✉</sup>, Dmitry G. Ardukov<sup>2</sup>, Anton V. Timofeev<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, Koptyug Ave., 3, Novosibirsk, 630090, Russia,

<sup>1</sup>TimofeevVY@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6029-7801>

<sup>2</sup>ArdyukovDG@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3089-7114>

<sup>3</sup>TimofeevAV@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7664-7244>

**Abstract.** The work analyzes the connection between a series of Turkish earthquakes in February 2023 and coseismic displacements and deformations on the Earth's surface. In areas of seismic rupture during the five days, there are recordings of three earthquakes on February 6 with magnitudes 7.8, 6.7, 7.5 and then for 5 days period – 42 events of magnitude 4.5–6.0. This work analyzed data obtained by various geodesy methods in the epicentral region. Coseismic effects in a 300 kilometers zone, covering a significant part of the East Anatolian Fault, are considered. Relative displacements up to 6 m have been recorded, with an average value 4 m. When for studying far-field effects, we used GPS network data from 27 international stations, of which seven stations located in Turkey. For the closest to the epicenters of the main aftershock on February 6, 2023, MERS station received coseismic 3D displacements up to 20 mm. The displacement and deformation fields have been constructed according to IGS data. Rates of coseismic deformations in the far zone reach up  $10^{-8}$ , which is an order of magnitude higher than the background values of  $10^{-9}$ . Post-seismic horizontal and vertical displacements rates of the Earth's surface in areas of Turkey, located to the southwest of the earthquake epicenters can be associated with floods. A study of displacements rates and deformations of the territory was carried out Turkey and its surroundings in the era of 2017–2023. Highlighted decrease displacement rates two years before seismic activation in 2023. The resulting picture of displacement and deformation rates reflects a current processes in the territory located on the borders of Anatolian Block and tectonic plates: Eurasian, Arabian, and African.

**Keywords:** deformations, displacements, geodetic methods, Turkish earthquakes, Anatolian faults, tectonic plates

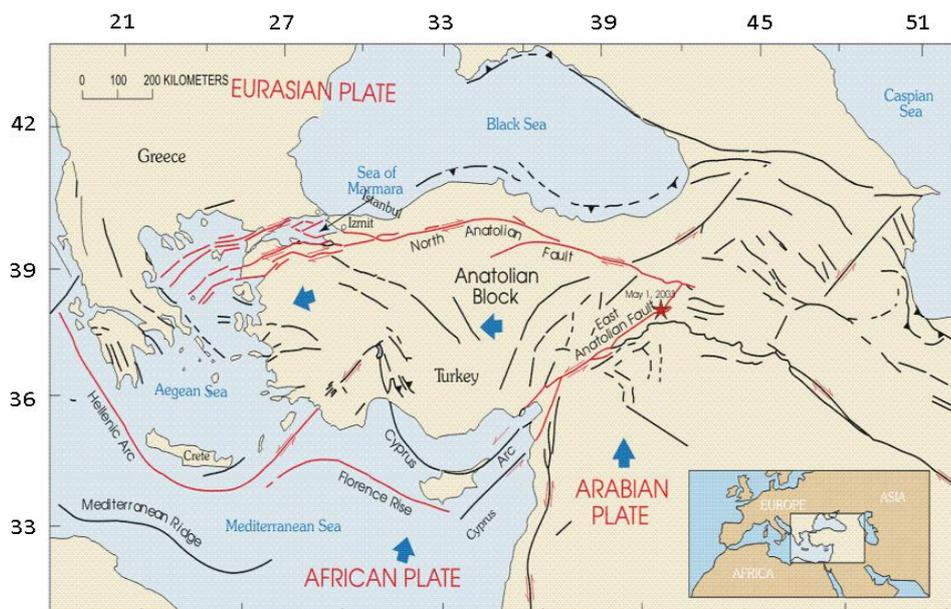
**Funding:** the study was carried out as part of government assignment to the Russian Academy of Sciences in basic research, Project FWZZ-2022-0019.

**For citation:** Timofeev V.Yu., Ardyukov D.G., Timofeev A.V. Deformation and displacements of Earth's surface in Turkish earthquakes era in February 2023 by geodesy data // Russian Journal of Geophysical Technologies. 2024. No. 2. P. 55–72. (In Russ.). doi:10.18303/2619-1563-2024-2-55.

## ВВЕДЕНИЕ

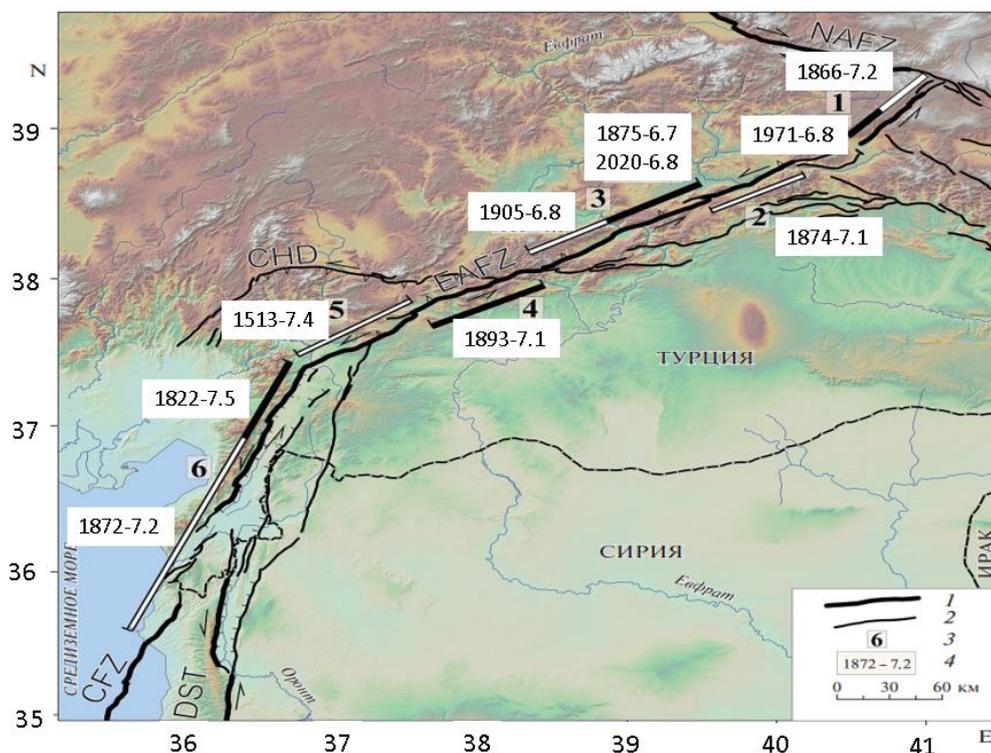
Согласно современным представлениям, возникновение большинства землетрясений трактуется в рамках теории, называемой тектоникой плит. Ее основная идея заключается в том, что внешняя оболочка Земли состоит из нескольких крупных и жестких пластин, которые называются плитами. Их количество достигало 53, но в настоящее время по модели ITRF-2014 остановились на 11. Известно, что представления о кинематике литосферных плит основано на допущении об их внутренней стабильности и локализации межплитных деформаций вдоль границ плит [Fernandes et al., 2003; Altamimi et al., 2016, 2017]. 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, одним из которых является землетрясение. Яркий пример такого явления – последние турецкие землетрясения, случившиеся на границах Евразийской, Аравийской и Африканской тектонических плит в области Восточно-Анатолийской разлома (EAF) (рис. 1) [Holzer et al., 2000].

Касаясь истории вопроса, можно отметить, что эта область не так активна, как северная часть Анатолийского блока, Северо-Анатолийский разлом (NAF), где за период 1939–1999 гг. зарегистрировано 9 землетрясений  $M > 7$  (1939, 1942, 1943, 1944, 1951, 1957, 1967, 1992, 1999), которые в итоге охватывают всю область разлома. Скорость смещений Анатолийского блока на запад по GPS данным составляет 20–28 мм/год.



**Рис. 1.** Карта района исследований, включающая Анатолийский блок, ограниченный с севера Северо-Анатолийским разломом, с востока Восточно-Анатолийским разломом. Звезда – эпицентр первого землетрясения 06.02.2023 г. Стрелками показано направление смещения тектонических плит (Африканской, Аравийской и Анатолийского блока) относительно Евразийской плиты. Широта и долгота в градусах.

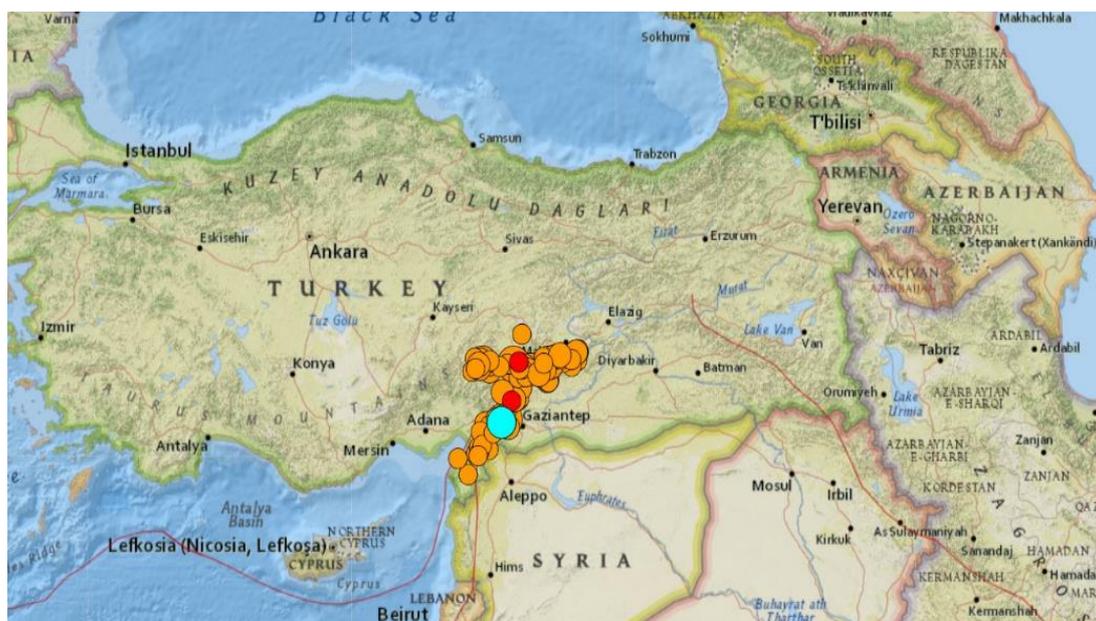
Другая картина наблюдается на восточной границе Анатолийского блока. Сильные исторические землетрясения в Восточно-Анатолийской разломной зоне (EAFZ), известные за последние пятьсот лет, показаны на рис. 2.



**Рис. 2.** Сейсмотектоническая сегментация EAFZ. В легенде (внизу справа) цифрами отмечены области воздействия землетрясения вдоль разрыва (1), разломы (2), номер сегмента (3), дата и магнитуда исторического землетрясения (4). Цифрами на карте обозначены сегменты EAF: 1 – Карлиова–Бингёль; 2 – Палу–оз. Хазар; 3 – оз. Хазар–Синджик; 4 – Челикхан–Эркенек; 5 – Гёльбаши–Тюркоглу; 6 – Тюркоглу–Антакия [Челик и др., 2023].

По геологическим данным средняя скорость смещения при сдвиге по EAFZ оценивается в 6–8 мм/год. Современные движения в EAFZ изучены методом GPS. Согласно GPS-данным, левосторонние сдвиговые смещения вдоль EAFZ изменяются от 9–10 мм/год в центральной части до 6–7 мм/год в его южной области, где появляется компонента поперечного растяжения [Челик и др., 2023].

Последние известные события в EAFZ отмечены в 2023 г. Здесь, начиная с 6 февраля 2023 г., началась мощная активизация (рис. 3). Информация о наиболее сильных событиях, зарегистрированных 6 февраля, приведена в табл. 1.



**Рис. 3.** Положение эпицентров землетрясений за период 06.02.23–10.02.23: круг салатного цвета  $M = 7.8$ , красного цвета  $M = 6.7$  и  $M = 7.5$  (06.02.23), коричневого цвета  $M = 4.5–6.0$  за период (06.02.23–10.02.23) [<https://earthquake.usgs.gov>].

Таблица 1

**Параметры землетрясений в Турции ( $M > 6$ ), произошедших 06.02.2023 г.** [<https://earthquake.usgs.gov>]

Время (UT)	Магнитуда	Широта, °N	Долгота, °E	Место
1:17:35	7.8	37.174	37.032	33 км западнее Газиантепа
1:28:15	6.7	37.127	36.943	14 км к востоку от г. Нурда
10:24:49	7.5	38.008	37.211	4 км восточнее Экинезю

Сейсмические события в Турции являются объектами активного исследования с использованием различных геофизических полей [Адушкин и др., 2023; Михайлов и др., 2023а; Atanasova et al., 2023; Barbot et al., 2023; Eppelbaum et al., 2023; Li et al., 2023; Över et al., 2023; Utkucu et al., 2023; Zhao et al., 2023]. Несколько сейсмологических центров мира вычисляли параметры мощной серии землетрясений в Турции. Результаты определения показывают разброс результатов: так для глубины первого землетрясения спектр оценок меняется от 10 до 32 км, а магнитуда от 7.7. до 8.0. Для второго землетрясения получены оценки глубины от 7 до 15 км, а для магнитуды от 7.5 до 7.8. Параметры нодальной плоскости показывают еще больший разброс, авторы многочисленных анализов косейсмических смещений [Михайлов и др., 2023б; Barbot et al., 2023] уточняли положение сейсмических разрывов, используя геологические данные о расположении системы разломов в регионе.

Задача нашей работы – анализ полей смещений и деформации земной поверхности по геодезическим данным, полученным в эпицентральной области землетрясений в Турции в феврале 2023 г. различными геодезическими методами, и зарегистрированным в дальней зоне в косейсмическую эпоху и за несколько лет до активизации 2023 г.

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

В эпицентральной области вдоль линии сейсмических разрывов и разломов был выполнен большой объем геодезических измерений. На рисунках 4 и 5 показан процесс измерений и некоторые результаты смещений и деформации горных пород в эпицентральной зоне. По данным обследований в результате первого землетрясения поверхностный разрыв распространился на 290 км. На участке EAFZ северо-восточнее г. Тюркоглу максимальные сдвиговые смещения достигали 5.5 м. Разрыв второго землетрясения протянулся на 130 км. Здесь максимальные сдвиги достигли 6 м. Впоследствии в разломной области наблюдались обвалы горных пород, оползни и разжижение грунта.



**Рис. 4.** Левосторонний сдвиг по восточной ветви DST (Трансформа Мертвого моря) возле г. Нарли (сдвиг дорожного полотна) [Челик и др., 2023].



**Рис. 5.** Левосторонний сдвиг по EAFZ северо-восточнее области максимальных смещений: 1 – деформация и левосторонний сдвиг железнодорожного полотна на 5.7 м; 2 – сдвиг дорожного полотна на 5.35 м [Челик и др., 2023].

В результате геодезических измерений для области первого события 6 февраля 2023 г. получено распределение амплитуд левосторонних смещений при сдвиге вдоль активированной части EAFZ (рис. 6). Протяженность линии разрыва около 300 км, амплитуда относительных смещений по разрыву около 4 м.

Результаты локальных GPS-измерений (рис. 7) показывают в обоих случаях левостороннее смещение вдоль сейсмических разрывов, хотя из-за сложного рисунка разломов и разрывов земной поверхности картина достаточно сложна.

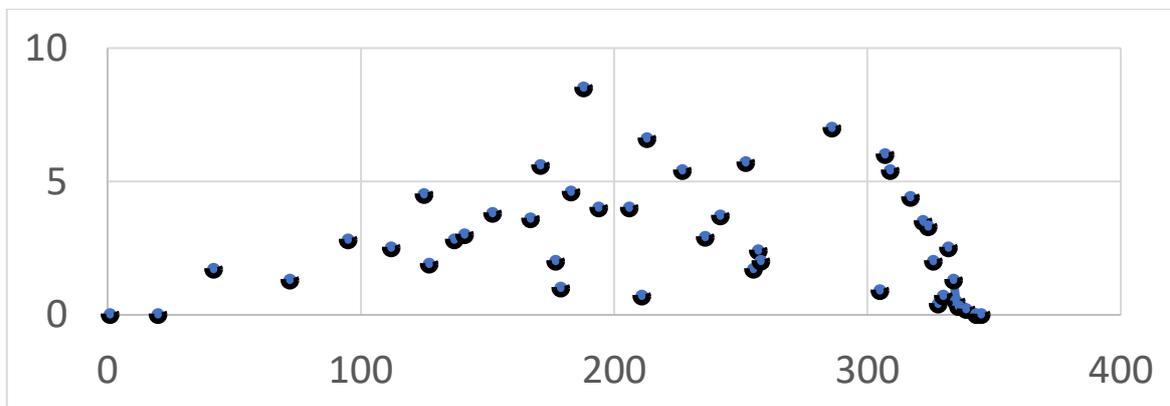


Рис. 6. Распределение амплитуд левосторонних смещений при сдвиге вдоль активированной части EAFZ.

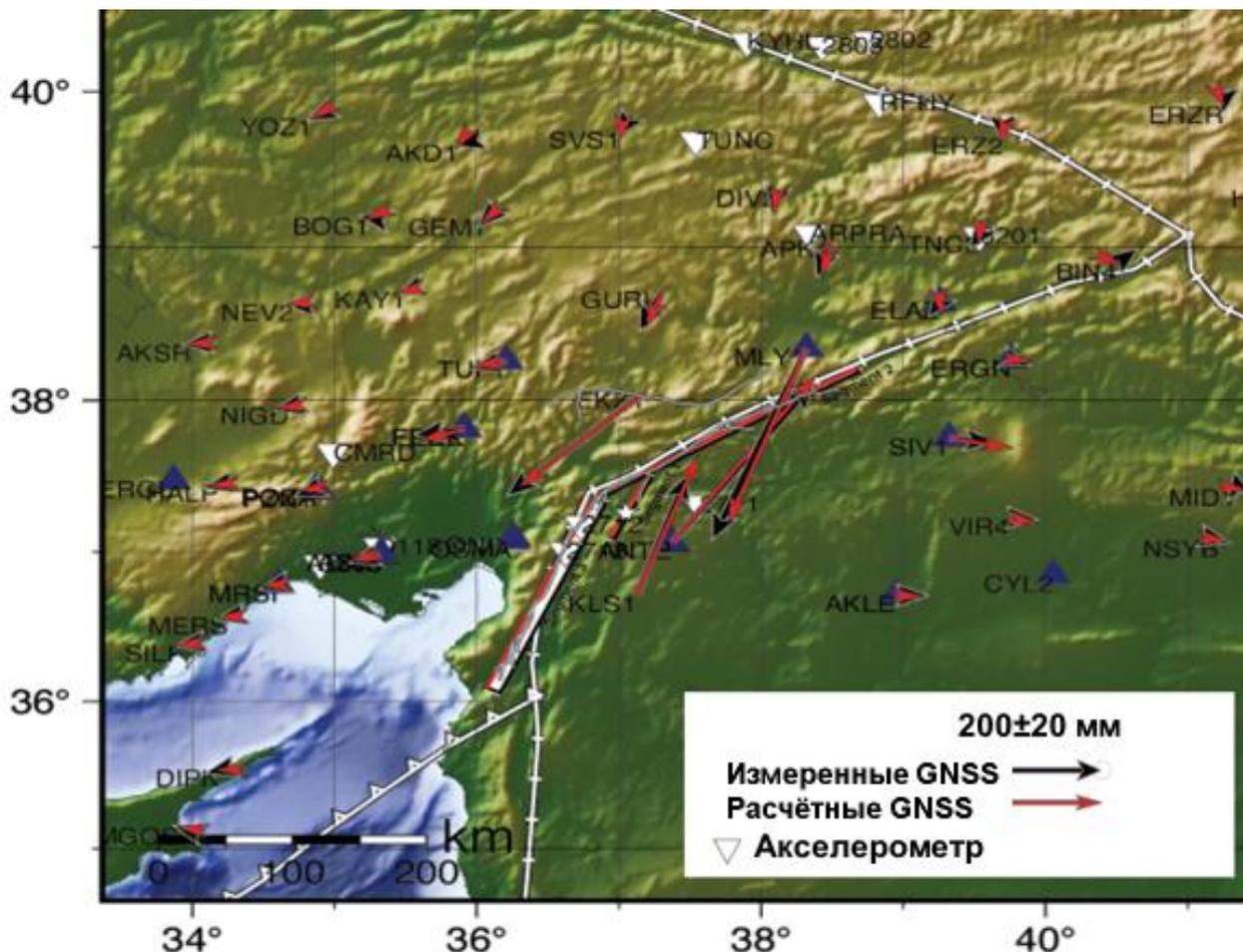
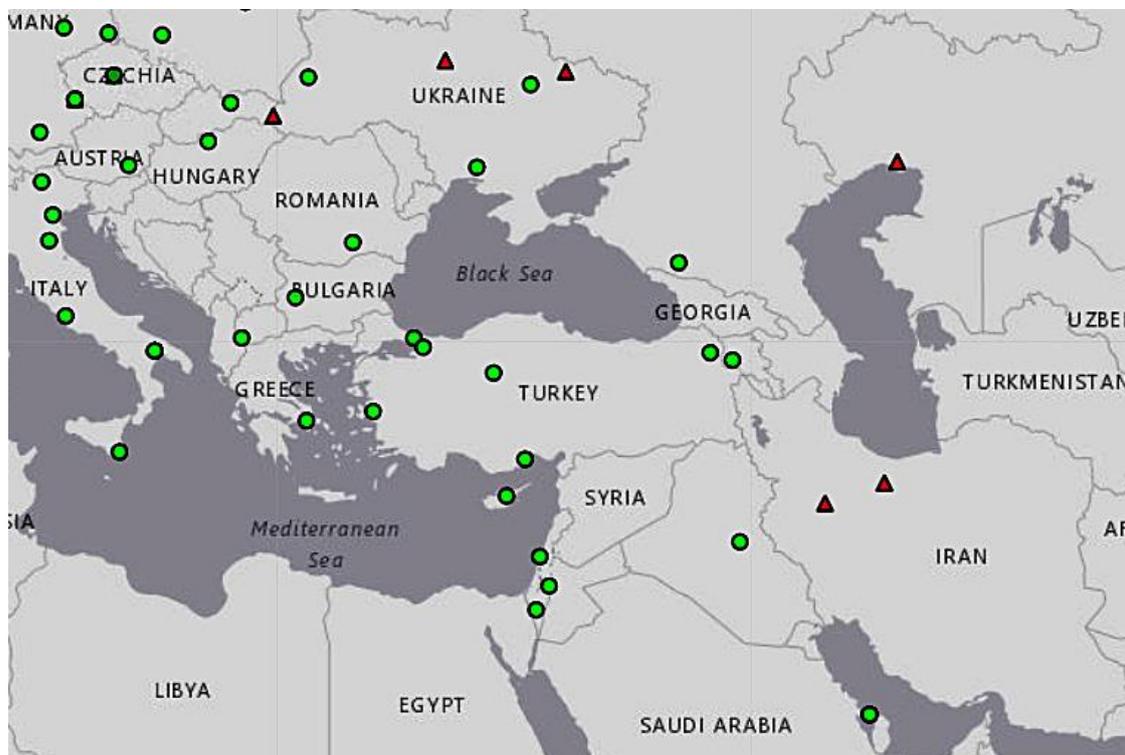


Рис. 7. Сегменты сейсмических разрывов при сильнейших землетрясениях провинции Караманмараш (обозначены синими и красными линиями), произошедших 06.02.2023 г., и косейсмические смещения на локальных GPS пунктах, результаты получены при первом землетрясении [<https://earthquake.usgs.gov>].

## МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ В ДАЛЬНОЙ ЗОНЕ

При анализе смещений в дальней зоне использованы открытые данные по постоянным GPS станциям сети IGS Турции и соседних стран (рис. 8).



**Рис. 8.** Положение станций космической геодезии: зеленые кружки – станции международной сети IGS, красные треугольники региональные пункты измерений [IGS net, <https://network.igs.org/>].

Собственно, в сети IGS для территории Турции имеется только семь станций наблюдений, в основном, по границам страны. Поэтому помимо станций Турции использованы материалы, полученные в соседних странах. При анализе материалов использовались специальные программные пакеты, наиболее распространенные в работе международных научных центров: GAMIT-GLOBK версии 10.71 [Herring et al., 2010]. Данные сетевых измерений обрабатывались с учетом результатов по мировой сети постоянных станций Евразии и ее окружения. Всего в расчеты принимались данные 27 станций. Координаты станций приведены в табл. 2.

Расчет плитных скоростей проводился в рамках модели ITRF-2014 [Altamimi et al., 2016]. В результатах анализа получаем геоцентрические скорости для каждого пункта. Например, для станции Новосибирск (Ключи, NVSK), расположенной на востоке сети, скорость смещения по определениям за период 2017–2023 гг. (по эпохе – 11 дней в феврале) составляет 1.04 мм/год на юг и 26.68 мм/год на восток, при ошибке 0.3–0.4 мм, что соответствует скорости по модели Евразии ITRF-2014 (–0.63; 26.4). Из решения для станции ZECK, скорости за период 2017–2023 гг. составили  $11.54 \pm 0.14$  мм/год на север;  $25.11 \pm 0.20$  мм/год на восток, что также соответствует модели Евразии ITRF-2014. Данные, полученные на постоянных станциях, в дальнейшем использованы для пространственного анализа по территории Турции и ее окружения. Наиболее близкой к будущему эпицентру оказалась станция MERS (см. табл. 2). Эпоха ежегодных измерений – с 1 по 11 февраля. На рисунке 9 показаны тестовые результаты по данным 2018 и 2022 гг.

Таблица 2

Координаты станций, данные которых использованы при определениях смещений и деформаций

Код станции и местоположение	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

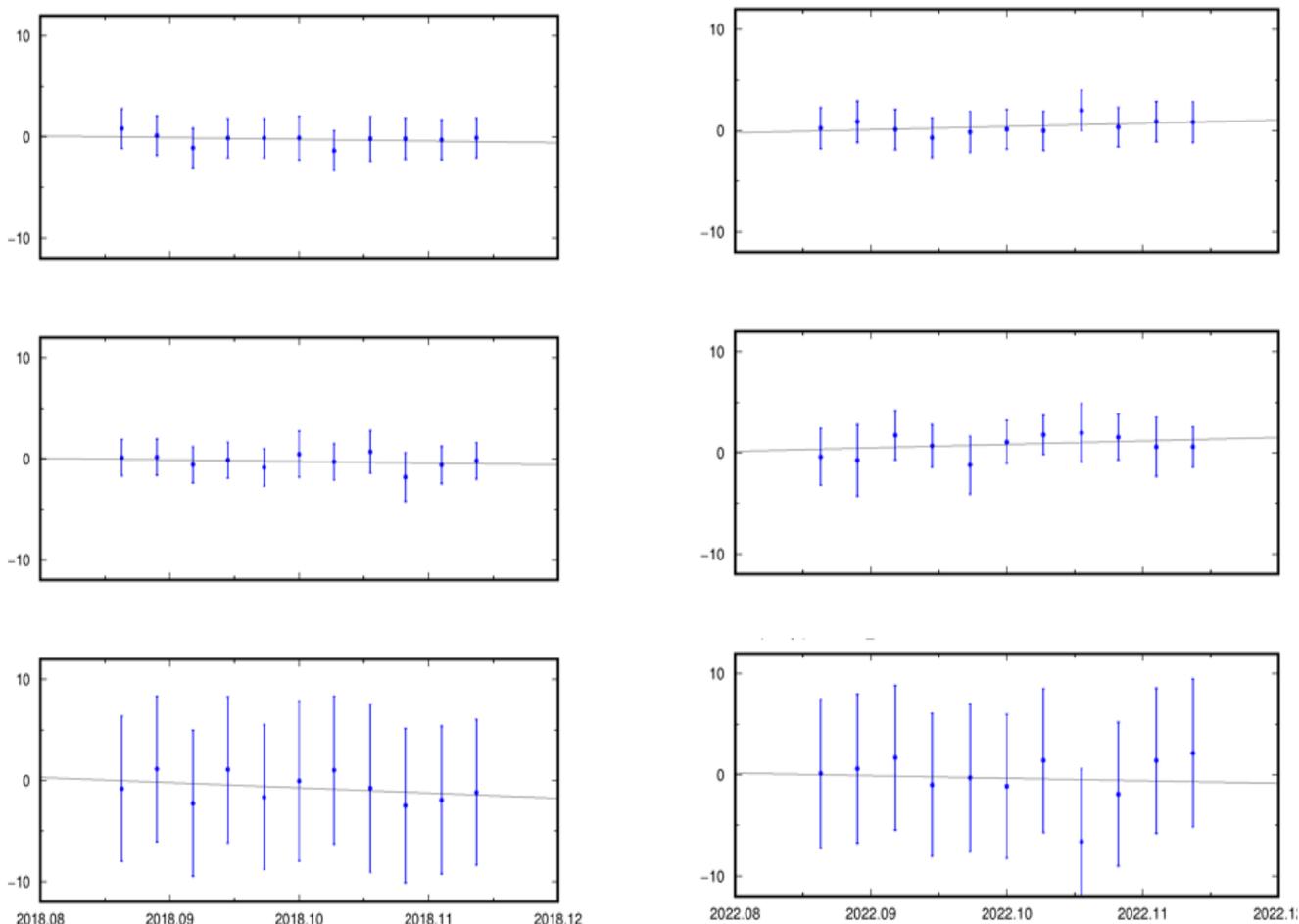
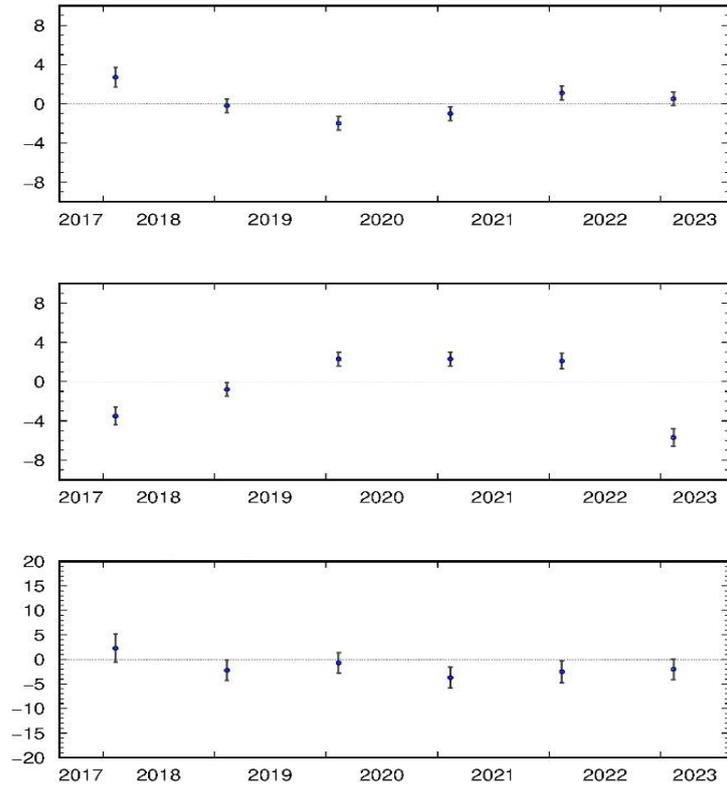
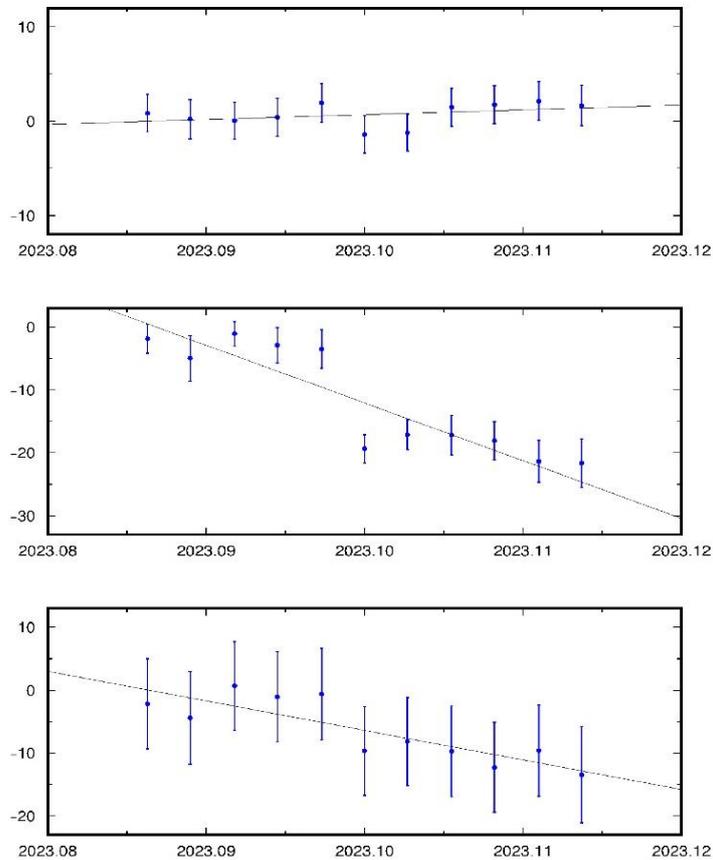


Рис. 9. Стабильность значения координат пункта MERS по ежедневным определениям для эпохи с 1 по 11 февраля 2018 и 2022 гг. Сверху вниз по широте, по долготе и по вертикали в миллиметрах. Время в сотых долях года.

Как видим по рассмотренным графикам (рис. 9), в результатах отсутствует сезонная компонента смещений на 11-ти дневной серии. Был проведен анализ многолетних смещений станции за период с 2017 по 2023 г. На рисунке 10 показаны вариации положения пункта при снятии линейного тренда.

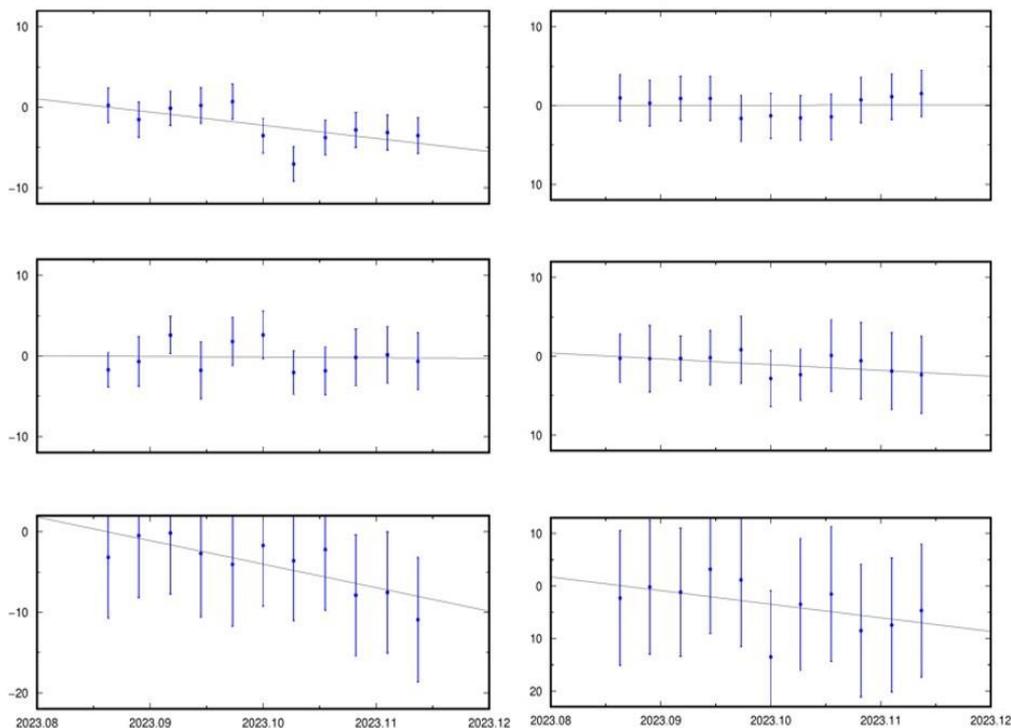


**Рис. 10.** Графики вариаций 3D смещений пункта MERS за период 2017–2023, сверху вниз по широте, по долготе и по высоте, линейный тренд, связанный с плитным движением, исключен ( $16.08 \pm 0.19$  мм/год;  $12.39 \pm 0.21$  мм/год;  $0.58 \pm 0.56$  мм/год). Вертикальная шкала в мм, горизонтальная – время.



**Рис. 11.** Графики 3D смещений пункта MERS по ежесуточным определениям за период с 01.02.2023 по 11.02.2023. Скачок смещений выделяется с 5 на 6 февраля. Вертикальная шкала в мм, горизонтальная – время.

Также в эпоху землетрясений с 1 по 11 февраля по ежедневным определениям получены вариации смещений по трем компонентам. Вариации 2023 г. приведены на рис. 11 и 12. Выделяется косейсмический скачок горизонтальных смещений и опускание пункта MERS в период с 5 по 6 февраля 2023 г.



**Рис. 12.** Графики 3D смещений пунктов ARUC и TUBI (табл. 2) по ежедневным определениям на период с 1 по 11 февраля 2023 г. Сверху вниз: север–юг, восток–запад, вверх–вниз. Вертикальная шкала в мм, горизонтальная – время в сотых долях года.

Расчет деформаций проводился методом триангуляции Делоне [Tregoning et al., 2013]. На изучаемой территории разбивается сеть треугольников. Для каждого треугольника определяется двумерный тензор деформации

$$E = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial y} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где  $(u, v)$  смещения по осям  $x$  и  $y$  соответственно. Нормальные деформации, сдвиговые деформации и параметры вращения вокруг оси  $z$  определяются в следующем виде [Turcotte, Schubert, 1982]:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_{xy} = \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) / 2, \quad (3)$$

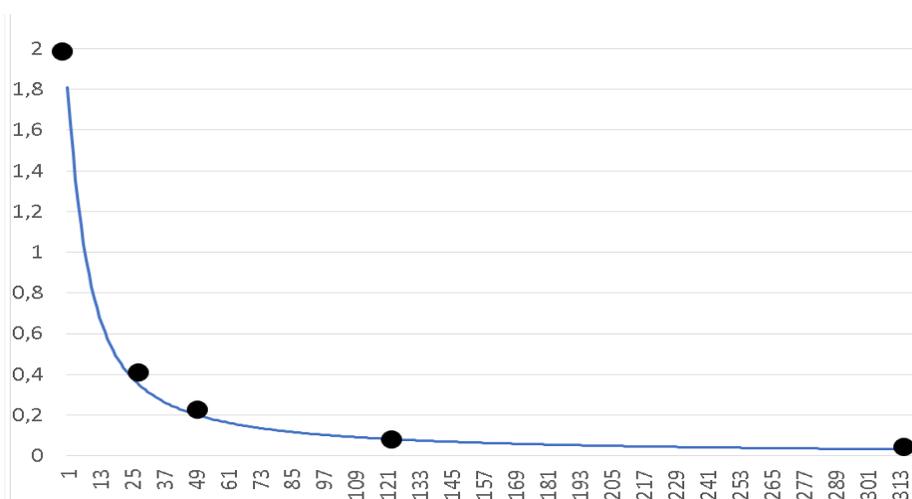
$$\omega_z = \left( \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial x} \right) / 2. \quad (4)$$

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как отмечено выше, результаты GPS-измерений в эпицентральной зоне показывают левостороннее смещения вдоль сейсмического разрыва. Используя GPS-данные локальной сети при первом землетрясении (см. рис. 7: MLY1(0.43 м), EKZ1 (0.27 м), GUR1 (0.07), AKD1(0.30м)) в рамках дислокационной модели землетрясения, получаем достаточно простое распределение левосторонних горизонтальных смещений с расстоянием от разлома (рис. 13). Для построения теоретической кривой, приведенной на рис. 13, использовано соотношение для смещений в зоне сдвига на вертикальном разрыве [Turcotte, Schubert, 1982]:

$$\Delta w(x) \equiv w(x) - w_0(x) = (\Delta w_0/2)[(1 + x^2/a^2)^{1/2} - x/a] \operatorname{sgn} x, \quad (5)$$

где  $\Delta w(x)$  – смещение в точке на расстоянии  $x$ ,  $\Delta w_0$  – относительное смещение по разрыву,  $x$  – расстояние от линии сейсмического разрыва,  $a$  – глубина. Использованы следующие параметры: глубина разрыва – 10 км, относительное смещение 4 м. Точки на рис. 13 – это измеренные значения смещений на разных расстояниях ортогонально линии разрыва. Для второго сильного землетрясения получены подобные распределения смещений, что типичного для землетрясений со сдвигом, выходящим на земную поверхность. Подобное распределение зарегистрировано, например, при Чуйском землетрясении 27.09.2003 г. ( $M = 7.3$ – $7.5$ ) в Горном Алтае [Тимофеев и др., 2019].



**Рис. 13.** Изменение смещений (в метрах, вертикальная шкала) в зависимости от расстояния до разрыва (в километрах, горизонтальная шкала) для первого сильного землетрясения 06.02.2023 г. Модельная кривая по соотношению (5), точки – экспериментальные данные.

Для определения скоростей современных смещений и координат пунктов периодических повторных измерений нами выполнялось сетевое относительное уравнивание, реализованное в программном пакете GAMIT/GLOBK разработки Массачусетского технологического института (англ. MIT) [Herring et al., 2010]. В дальней зоне, несмотря на то что наиболее близкий к эпицентрам землетрясений 6 февраля пункт MERS находится в 265 км от эпицентра, получены хорошие данные о косейсмическом смещении пункта (см. рис. 11). Выделено смещение пункта на 25 мм на ЮЗЗ. Косейсмические смещения отмечаются еще на нескольких станциях (см. рис. 12). По сейсмологическим данным при землетрясении зарегистрирован сдвиг на практически вертикальном разрыве, ориентированном на СВ, пункт MERS расположен на юго-западе вне зоны разрыва, здесь на краях разрыва кроме горизонтальной компоненты

появляется вертикальное опускание (см. рис. 8). Обращаясь к результатам анализа смещений, начиная с 2017 г., можно отметить аномальное замедление смещений с 2020 г. по горизонтальным компонентам.

Для расчета скоростей деформаций нами использовалось покрытие исследуемой территории конечным набором треугольных элементов. Для этого из набора исходных пунктов формировались треугольники, а с помощью алгоритма Делоне, реализованного в программном наборе инструментов Generic Mapping Tools [Teza et al., 2008; Wessel et al., 2019] определялись компоненты деформации. Размер стороны построенных треугольников изменяется от 100 км до нескольких сот километров.

Нижняя область сети представлена вырожденными треугольниками, которые не следует принимать в расчет. Рассматривая результаты определения различных характеристик скорости деформации территории, отметим, что наиболее интересной оказалась площадная деформация. Скорость площадной деформации треугольников ISTA-ZECK-MERS и ZECK-MERS-ARUC, охватывающих восточную часть Турции, часть акватории Черного моря и западную часть Кавказа, от практически нулевой в начале февраля 2023 г. сменилась растяжением  $-10^{-8}$  в конце декады. На рисунках 14 и 15 приведены результаты определения скорости площадной деформации в долях от  $1 \cdot 10^{-6}/\text{год}$ , а звездочками показаны эпицентры землетрясений. Анализ изменений скорости сдвиговой деформации до и после события показал, что величина скорости сдвига увеличилась в два раза (от  $4 \cdot 10^{-8}/\text{год}$  до  $10^{-7}/\text{год}$ ). Максимальные измерения отмечаются в западной части Турции. Ошибка определения величины деформации составляет 10 %.

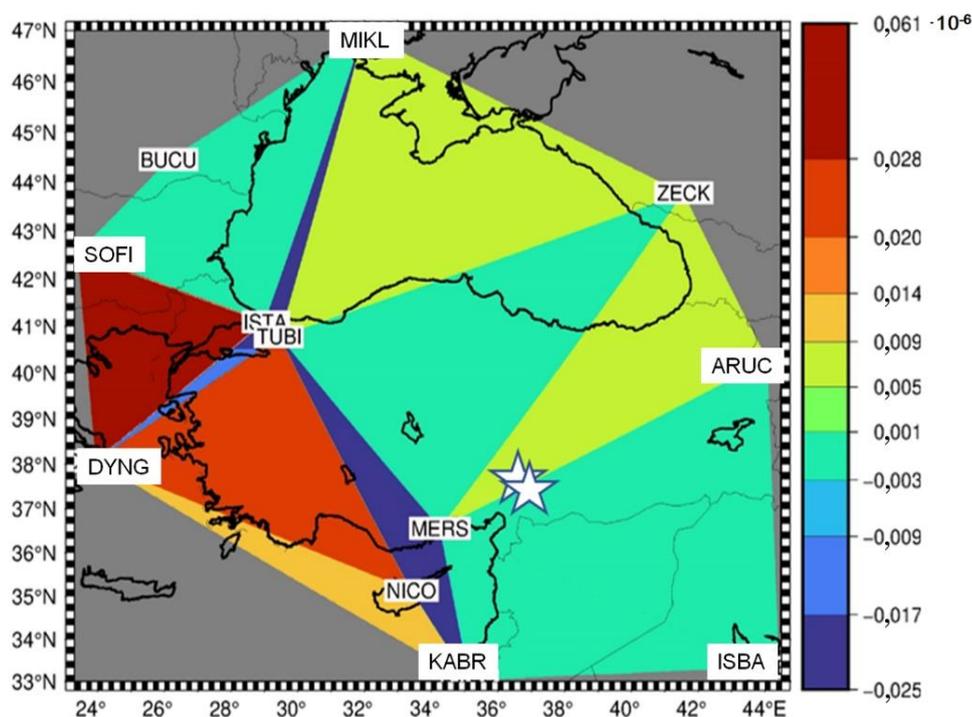


Рис. 14. Результаты определения скорости площадной деформаций 04.02.2023 г.

В эпоху после сейсмической активизации анализ результатов позволяет выделить аномалию в скорости смещения пунктов к юго-западу от эпицентров (рис. 16). Как отмечено выше, на пункте MERS после землетрясения зарегистрировано опускание (см. рис. 11), 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. 17).

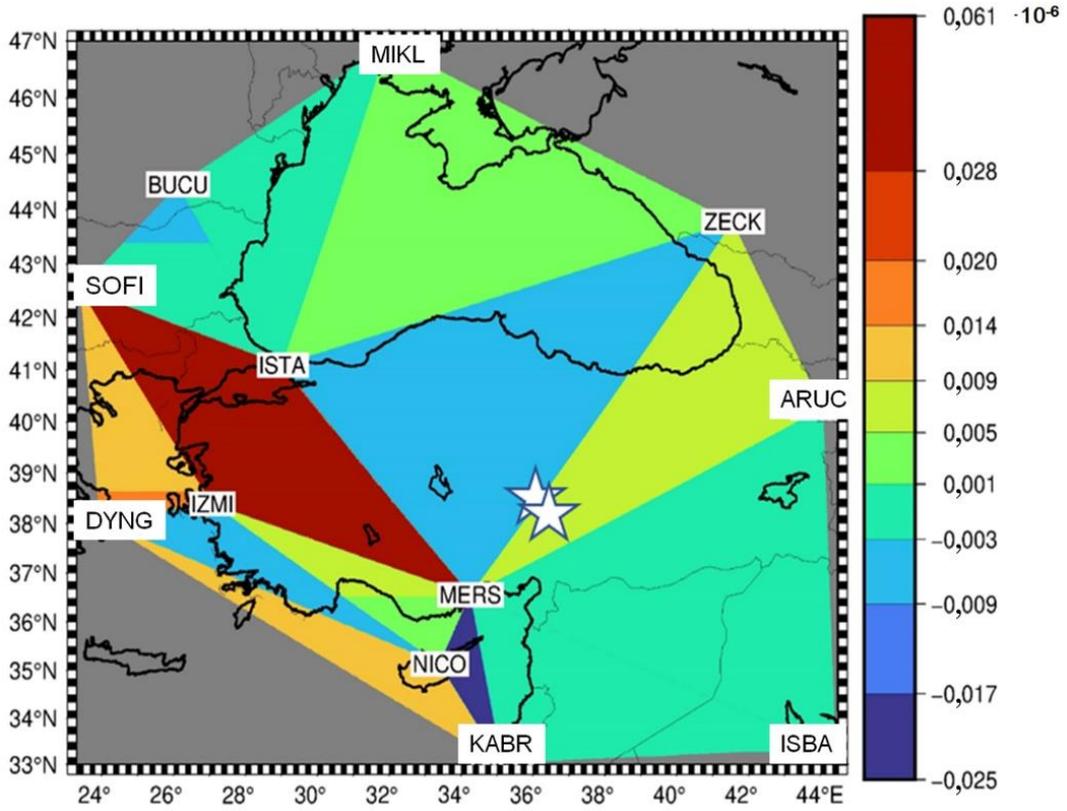


Рис. 15. Результаты определения скорости площадной деформаций 08.02.2023 г.

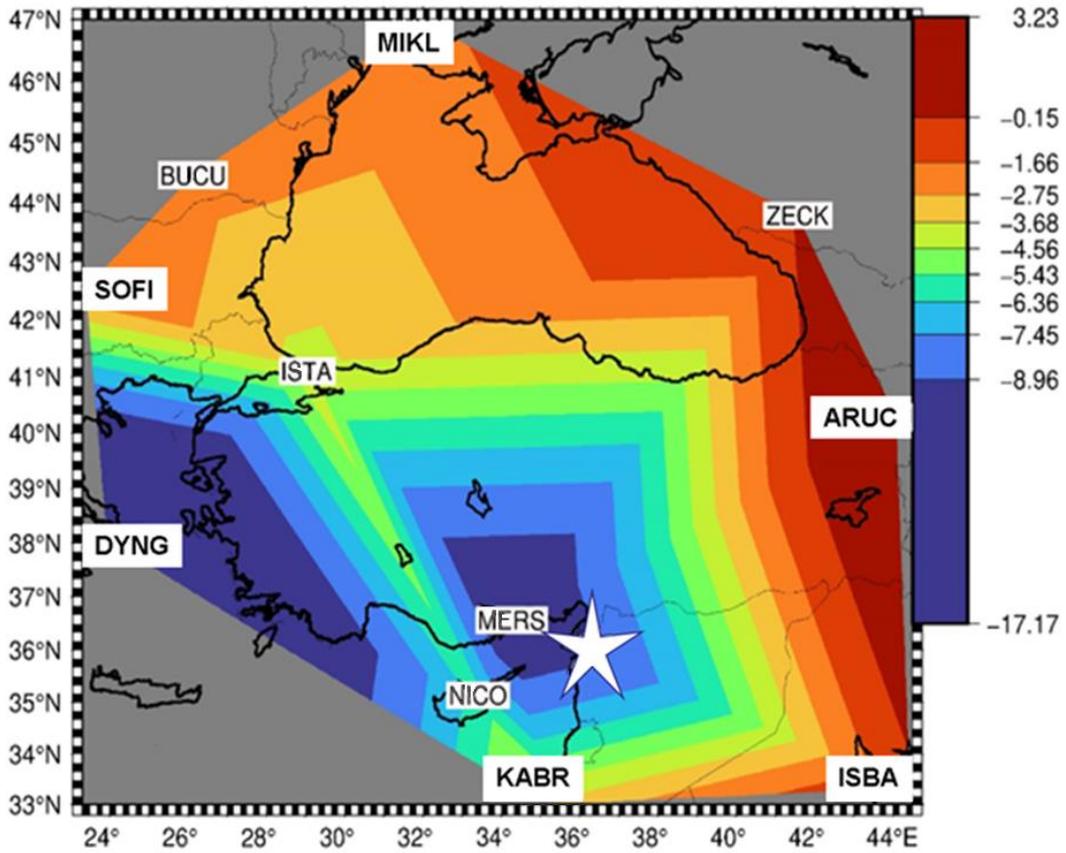


Рис. 16. Распределение скорости смещения на восток в мм по определениям 11 февраля 2023 г. Аномалия проявляется в районе городов Мерсина (MERS) и Искендеруна (положение отмечено звездочкой).



Рис. 17. Наводнение в г. Искендерун в марте 2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение сильнейших землетрясений последних десятилетий – Суматра-Андаманского (26.12.2004 г.,  $M_w = 9.1$ ), Чилийского (27.02.2010 г.,  $M_w = 8.8$ ), Тохоку (11.03.2011 г.,  $M_w = 9.1$ ) показали, что инициированные такими сейсмическими событиями косейсмические смещения и деформации земной коры, могут охватывать огромные территории площадью в миллионы квадратных километров [Tregoning et al., 2013]. Одним из способов регистрации и изучения таких движений являются геодезические методы, которые позволяют определять их величины в режиме реального времени [Fratarcangeli et al., 2018] и с ошибками порядка нескольких миллиметров при ретроспективном анализе. Получаемая информация о косейсмических смещениях необходима для моделирования процессов в очагах землетрясений, а также при разработке и функционировании систем раннего предупреждения о них [Blewitt et al., 2009]. При изучении косейсмических явлений, появившихся в результате серии Турецких землетрясений в феврале 2023 г., использована вся доступная информация по смещениям земной поверхности. В работе проанализированы данные, полученные различными методами геодезии в эпицентральной области. Рассматриваются косейсмические эффекты в 300-километровой зоне, охватывающей значительную часть Восточно-Анатолийского разлома. Здесь зарегистрированы относительные смещения до 6 м, при среднем значении 4 м. Картина косейсмических смещений хорошо соответствует дислокационной теории землетрясений при сдвиге на субвертикальном разрыве, выходящем на поверхность. В дальней зоне по GPS-данным поле смещений было получено в рамках модели ITRF-2014 по сети из 27 пунктов IGS. Для наиболее близкой к очагу главного толчка 6 февраля 2023 г. станции MERS получены косейсмические смещения по трем направлениям, величиной до 20 мм, что соответствует сейсмологическим данным. Анализ данных за период 2017–2023 гг. показал затухание смещений за два года до сейсмической активизации 2023 г. В целом скорости косейсмических деформаций при величине сторон треугольников, используемых в триангуляции до нескольких сотен километров, достигают  $-10^{-8}$ , что на порядок выше фоновых значений  $10^{-9}$ . В эпоху после сейсмической активизации анализ результатов позволяет выделить аномалию в скорости смещения пунктов к юго-западу от эпицентров за пределами сейсмического разрыва

(см. рис. 11 и 16). В этой области после землетрясения зарегистрировано опускание, а далее, в марте, наводнение (до 0.6–0.8 м). В целом, полученная картина смещений и деформаций отражает современный процесс на границах Анатолийского блока и тектонических плит: Африканской, Арабской и Евразийской.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Адушкин В.В., Спивак А.А., Рыбнов Ю.С., Тихонова А.В.** Серия катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023 г. и возмущение геофизических полей // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510, № 2. С. 227–232. doi:10.31857/S2686739723600327.
- Михайлов В.О., Бабаянц И.П., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Тихоцкий С.А.** Землетрясения в Турции 06.02.2023: модель поверхности разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2023а. Т. 511, № 1. С. 71–77. doi:10.31857/S2686739723600625.
- 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. 2023б. № 6. С. 77–88. doi:10.31857/S000233372306011X.
- Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г., Тимофеев А.В., Бойко Е.В.** Современные движения земной поверхности Горного Алтая по GPS-наблюдениям // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10, № 1. С. 123–146. doi:10.5800/GT-2019-10-1-0407.
- Челик Х., Трихунков Я.И., Соколов С.А., Трифонов 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. doi:10.31857/S0002333723060054.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.** ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2016. Vol. 121 (8). P. 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098.
- Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., Rouby H., Collilieux X.** ITRF2014 plate motion model // Geophysical Journal International. 2017. Vol. 209 (3). P. 1906–1912. doi:10.1093/gji/ggx136.
- Atanasova M., Raykova P., Nikolov H.** Determining the deformations of the Earth's Surface after the earthquakes in Turkey–Syria of 06 February 2023 – Initial Results // Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences. 2023. Vol. 76 (4). P. 554–562. doi:10.7546/CRABS.2023.04.07.
- 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 (3). doi:10.26443/seismica.v2i3.502.
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C., Plag H-P., Stein S., Okal E.** GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems // Journal of Geodesy. 2009. Vol. 83. P. 335–343. doi:10.1007/s00190-008-0262-5.
- Eppelbaum L.V., Katz Y.I., Ben-Avraham Z.** Why did such giant stress accumulate on the joining of four tectonic plates in eastern Turkey? // A Review. Preprints. 2023. doi:10.20944/preprints202308.1252.v1.
- Fernandes R.M.S., Ambrosius B.A.C., Noomen R., Bastos L., Wortel M.J.R., Spakman W., Govers R.** The relative motion between Africa and Eurasia as derived from ITRF2000 and GPS data // Geophysical Research Letters. 2003. Vol. 30 (16). 1828. doi:10.1029/2003GL017089.

- Fratarcangeli F., Savastano G., D'Achille M.C., Mazzoni A., Crespi M., Riguzzi F., Devoti R., Pietrantonio G.** VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: application to the Central Italy 2016 earthquakes // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10 (8). 1201. doi:10.3390/rs10081201.
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.** Introduction to GAMIT/GLOBK. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2010.
- Holzer T.L., Barka A.A., Carver D., Çelebi M., Cranswick E., Dawson T., Dieterich J.H., Ellsworth W.L., Fumal T., Gross W.L., Langridge R., Lettis W.R., Meremonte M., Mueller C., Olsen R.S., Ozel O., Parsons T., Phan L.T., Rockwell T., Safak E., Stein R.S., Stenner H., Toda S., Toprak S.** Implications for earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999. U.S. Geological Survey. Circular 1193. Denver, 2000. <https://pubs.usgs.gov/circ/2000/1193/report.pdf>.
- Li S., Wang X., Tao T., Zhu Y., Qu X., Li Z., Huang J., Song S.** Source model of the 2023 Turkey earthquake sequence imaged by Sentinel-1 and GPS measurements: implications for heterogeneous fault behavior along the East Anatolian Fault Zone // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. 2618. doi:10.3390/rs15102618.
- Över S., Demirci A., Özden S.** Tectonic implications of the February 2023 earthquakes (Mw 7.7, 7.6, and 6.3) in south-eastern Türkiye // *Tectonophysics*. 2023. Vol. 866. 230058. doi:10.1016/j.tecto.2023.230058.
- 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.
- Tregoning P., 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.
- Turcotte D.L., Schubert G.** Geodynamics: application of continuum physics to geological problems. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Utkucu M., Durmuş H., Uzunca F., Nalbant S.** A preliminary report on the 2023 Gaziantep (Mw= 7.7) and Elbistan (Mw= 7.5) earthquakes in southeast Türkiye. Sakarya University, Sakarya, 2023. doi:10.13140/RG.2.2.17088.40963.
- Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H., Tian D.** The generic mapping tools, version 6 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. Vol. 20 (11). P. 5556–5564. doi:10.1029/2019GC008515.
- Zhao J.-J., Chen Q., Yang Y.-H., Xu Q.** Coseismic faulting model and post-seismic surface motion of the 2023 Turkey–Syria earthquake doublet revealed by InSAR and GPS measurements // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15 (13). 3327. doi:10.3390/rs15133327.

## REFERENCES

- Adushkin V.V., Spivak A.A., Rybnov Yu.S., Tikhonova A.V.** The series of catastrophic earthquakes of February 6, 2023, in Turkey and variations in the geophysical fields // *Doklady Earth Sciences*. 2023. Vol. 510 (2). P. 481–486. doi:10.1134/S1028334X23600287.
- Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X.** ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions // *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016. Vol. 121 (8). P. 6109–6131. doi:10.1002/2016JB013098.

- Altamimi Z., Métivier L., Rebischung P., Rouby H., Collilieux X.** ITRF2014 plate motion model // *Geophysical Journal International*. 2017. Vol. 209 (3). P. 1906–1912. doi:10.1093/gji/ggx136.
- Atanasova M., Raykova P., Nikolov H.** Determining the deformations of the Earth's Surface after the earthquakes in Turkey–Syria of 06 February 2023 – Initial Results // *Proceeding of the Bulgarian Academy of Sciences*. 2023. Vol. 76 (4). P. 554–562. doi:10.7546/CRABS.2023.04.07.
- 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 (3). doi:10.26443/seismica.v2i3.502.
- Blewitt G., Hammond W.C., Kreemer C., Plag H-P., Stein S., Okal E.** GPS for real-time earthquake source determination and tsunami warning systems // *Journal of Geodesy*. 2009. Vol. 83. P. 335–343. doi:10.1007/s00190-008-0262-5.
- Eppelbaum L.V., Katz Y.I., Ben-Avraham Z.** Why did such giant stress accumulate on the joining of four tectonic plates in eastern Turkey? // *A Review. Preprints*. 2023. doi:10.20944/preprints202308.1252.v1.
- Fernandes R.M.S., Ambrosius B.A.C., Noomen R., Bastos L., Wortel M.J.R., Spakman W., Govers R.** The relative motion between Africa and Eurasia as derived from ITRF2000 and GPS data // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30 (16). 1828. doi:10.1029/2003GL017089.
- Fratarcangeli F., Savastano G., D'Achille M.C., Mazzoni A., Crespi M., Riguzzi F., Devoti R., Pietrantonio G.** VADASE reliability and accuracy of real-time displacement estimation: application to the Central Italy 2016 earthquakes // *Remote Sensing*. 2018. Vol. 10 (8). 1201. doi:10.3390/rs10081201.
- Çelik H., Trikhunkov Y.I., Sokolov S.A., Trifonov V.G., Zelenin E.A., Kargınoğlu Y., Yushin K.I., Lomov V.S., Bachmanov D.M.** Tectonic aspects of the East Anatolian 06.02.2023 earthquake in Türkiye // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023. Vol. 59 (6). P. 822–838. doi:10.1134/S1069351323060058.
- Herring T.A., King R.W., McClusky S.C.** *Introduction to GAMIT/GLOBK*. Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2010.
- Holzer T.L., Barka A.A., Carver D., Çelebi M., Cranswick E., Dawson T., Dieterich J.H., Ellsworth W.L., Fumal T., Gross W.L., Langridge R., Lettis W.R., Meremonte M., Mueller C., Olsen R.S., Ozel O., Parsons T., Phan L.T., Rockwell T., Safak E., Stein R.S., Stenner H., Toda S., Toprak S.** Implications for earthquake risk reduction in the United States from the Kocaeli, Turkey, earthquake of August 17, 1999. U.S. Geological Survey. Circular 1193. Denver, 2000. <https://pubs.usgs.gov/circ/2000/1193/report.pdf>.
- Li S., Wang X., Tao T., Zhu Y., Qu X., Li Z., Huang J., Song S.** Source model of the 2023 Turkey earthquake sequence imaged by Sentinel-1 and GPS measurements: implications for heterogeneous fault behavior along the East Anatolian Fault Zone // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15. 2618. doi:10.3390/rs15102618.
- Mikhailov V.O., Babayantz I.P., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Smirnov V.B., Tikhotskiy S.A.** The February 6, 2023, earthquakes in Turkey: a model of the rupture surface based on satellite radar interferometry // *Doklady Earth Sciences*. 2023a. Vol. 511. P. 571–577. doi:10.1134/S1028334X23600627.
- Mikhailov V.O., Babayantz I.P., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Smirnov V.B., Tikhotskiy S.A.** Reconstruction of co-seismic and post-seismic processes for the February 6, 2023 Earthquake in Turkey from data of satellite SAR interferometry // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2023b. Vol. 6. P. 888–898. doi:10.1134/S1069351323060113.

- Över S., Demirci A., Özden S.** Tectonic implications of the February 2023 earthquakes (Mw 7.7, 7.6, and 6.3) in south-eastern Türkiye // *Tectonophysics*. 2023. Vol. 866. 230058. doi:10.1016/j.tecto.2023.230058.
- 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.
- Timofeev V.Yu., Ardyukov D.T., Timofeev A.V., Boiko E.V.** Modern movements of the crust surface in Gorny Altai from GPS data of earth surface of Gorny Altai by GPS data // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2019. Vol. 10 (1). P. 123–146. (in Russ.). doi:10.5800/GT-2019-10-1-0407.
- Tregoning P., 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.
- Turcotte D.L., Schubert G.** *Geodynamics: application of continuum physics to geological problems*. John Wiley & Sons, New York, 1982.
- Utkucu M., Durmuş H., Uzunca F., Nalbant S.** A preliminary report on the 2023 Gaziantep (Mw= 7.7) and Elbistan (Mw= 7.5) earthquakes in southeast Türkiye. Sakarya University, Sakarya, 2023. doi:10.13140/RG.2.2.17088.40963.
- Wessel P., Luis J.F., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W.H., Tian D.** The generic mapping tools, version 6 // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. Vol. 20 (11). P. 5556–5564. doi:10.1029/2019GC008515.
- Zhao J.-J., Chen Q., Yang Y.-H., Xu Q.** Coseismic faulting model and post-seismic surface motion of the 2023 Turkey–Syria earthquake doublet revealed by InSAR and GPS measurements // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15 (13). 3327. doi:10.3390/rs15133327.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*ТИМОФЕЕВ Владимир Юрьевич* – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: гравиметрия, вариации силы тяжести, приливные деформации Земли, современные движения земной коры, тектоника плит, космическая геодезия, моделирование современных геодинамических процессов.

*АРДЮКОВ Дмитрий Геннадьевич* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: современные движения земной коры, тектоника плит, космическая геодезия, технология обработки геодезических данных, моделирование современных геодинамических процессов.

*ТИМОФЕЕВ Антон Владимирович* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией физических проблем геофизики Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН. Основные научные интересы: современные движения земной коры, тектоника плит, космическая геодезия, моделирование современных геодинамических процессов, неприливные вариации силы тяжести.

*Статья поступила в редакцию 17 августа 2023 г.,  
одобрена после рецензирования 13 июня 2024 г.,  
принята к публикации 21 июня 2024 г.*