

УДК 539.3

EDN: MRVUUE DOI: 10.31429/vestnik-20-2-18-27

Геодинамика Азово-Черноморского побережья в период Турецких землетрясений в феврале-марте 2023 г.

В. В. Калинин¹, В. Л. Шестопалов¹, Б. Н. Алёшин², А. С. Мухин³,
В. М. Шереметьев⁴

¹ Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук, пр. Чехова 41, Ростов-на-Дону, 350049, Россия

² Акционерное общество «Южморгеология», ул. Крымская 20, Геленджик, 353461, Россия

³ Кубанский государственный университет, ул. Ставропольская, 149, Краснодар, 350059, Россия

⁴ Южное межрегиональное управление Росприроднадзора, ул. Красная, 19, Краснодар, 350000, Россия

✉ Шестопалов Валерий Леонидович; ORCID 0000-0002-6928-5855; e-mail: valcpg@mail.ru

Аннотация. Рассматривается развитие геодинамических процессов на территории Азово-Черноморского побережья в период прохождения землетрясений в Турции 06.02.2023 по данным непрерывных GPS-измерений. Наблюдаемое смещение спутниковых пунктов Геленджик, Темрюк, Сочи и Лесное к северо-западу от тренда может быть вызвано нарастающим давлением Анатолийской плиты на северный борт Черноморской впадины. После сейсмособытий 06.02.2023 в Турции наблюдается проседание этих пунктов по высоте, что указывает на релаксацию напряжений в районе исследований. По данным предельных деформаций сдвига, полученных в национальной сети Турции TNPNGN-Active (1,5 и 5,2 м) оценка магнитуды ожидаемых землетрясений в районе Восточно-Анатолийского разлома составила 7,1 и 7,5 что близко к значениям произошедших землетрясений 7,5 и 7,8. Оценка времени проявления геодинамической активности на исследуемой территории с момента прохождения турецких землетрясений 06.02.2023 составляет от 8 до 80 лет для эмпирической модели миграции эпицентров землетрясений и 1,6 месяца для нелинейной ротационной модели сейсмического процесса что подтверждается усилением сейсмичности на Кавказе и активизацией грязевых вулканов на Таманском полуострове весной 2023 г. Предложено использовать непрерывные наблюдения на пунктах сети TNPNGN-Active (в первую очередь ANTE, ONIY, MLT1 и EKZ1) за период 2016–2023 гг. для определения интегрального критерия напряжённости земной коры по методологии, разработанной в ЮНЦ РАН, с целью ретроспективного мониторинга геодинамических процессов и раннего предупреждения сейсмической опасности.

Ключевые слова: землетрясения в Турции, сейсмическая активность, GNSS-измерения, Азово-Черноморское побережье.

Финансирование. Работа выполнена по теме Южного научного центра РАН «Исследование сложных природных и техногенных процессов с применением метода блочного элемента», № госрегистрации проекта 122020100341-0, и контракта АО «Южморгеология» № 01/2018-04-ЮРЦ (03) «Ведение наблюдений за геофизическими и газо-гидрогеохимическими полями в пределах Азовской, Черноморской и Каспийской прибрежных зон Северо-Кавказского сейсмоактивного региона» и Минобрнауки, КубГУ (проект FZEN-2023-0006).

Цитирование: Калинин В. В., Шестопалов В. Л., Алёшин Б. Н., Мухин А. С., Шереметьев В. М. Геодинамика Азово-Черноморского побережья в период Турецких землетрясений в феврале-марте 2023 г. // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2023. Т. 20, № 2. С. 18–27. EDN: MRVUUE. DOI: 10.31429/vestnik-20-2-18-27

Поступила 16 июня 2023 г. После доработки 21 июня 2023 г. Принято 23 июня 2023 г. Публикация 30 июня 2023 г.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Концепция работы (В.В. Калинин, Б.Н. Алёшин), проведение экспериментов, вычислений (В.Л. Шестопалов, А.С. Мухин), анализ данных (В.Л. Шестопалов, В.М. Шереметьев), написание статьи и внесение правок (В.В. Калинин, Б.Н. Алёшин, В.Л. Шестопалов, В.М. Шереметьев).

© Автор(ы), 2023. Статья открытого доступа, распространяется по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Geodynamics of the Azov–Black Sea Coast During the Period of Turkish Earthquakes in February–March 2023

V. V. Kalinchuk¹, V. L. Shestopalov¹, B. N. Alyoshin², A. S. Mukhin³, V. M. Sheremetyev⁴

¹ Federal Research Center Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, pr. Chekhova 41, Rostov-on-Don, 350049, Russia

² Yuzhmorgeologiya Joint Stock Company, Krymskaya str. 20, Gelendzhik, 353461, Russia

³ Kuban State University, 149 Stavropol Str., Krasnodar, 350059, Russia

⁴ Southern Interregional Department of Rosprirodnadzor, 19 Krasnaya str., Krasnodar, 350000, Russia

✉ Valerij L. Shestopalov; ORCID 0000-0002-6928-5855; e-mail: valcpg@mail.ru

Abstract. The development of geodynamic processes on the territory of the Azov-Black Sea coast during the period of earthquakes in Turkey 06.02.2023 is being considered according to continuous GPS measurements. The observed movement of geodynamic stations Gelendzhik, Temryuk, Sochi and Lesnoye northwest of the trend may be caused by the increasing pressure of the Anatolian plate on the northern side of the Black Sea Depression. After seismic events 06.02.2023 in Turkey there is a subsidence of these points in height, which indicates stress relaxation in the study area. According to the data of maximum slip rate obtained in the national network of Turkey TNPGN-Active (1.5 and 5.2 m), the estimated magnitude of expected earthquakes in the area of the East Anatolian fault was 7.1 and 7.5, which is close to the values of earthquakes 7.5 and 7.8. The estimate of the time of geodynamic activity in the studied area since the Turkish earthquakes 06.02.2023 is 8 to 80 years for the empirical model of earthquake epicenter migration and 1.6 months for the nonlinear rotational model of the seismic process, which is confirmed by the increase in seismicity in the Caucasus and the activation of mud volcanoes on the Taman Peninsula in the spring of 2023. It was proposed to use continuous observations at TNPGN-Active network stations (primarily ANTE, ONIY, MLT1 and EKZ1) for the period 2016-2023 to determine the integral criterion of crustal stress according to the methodology developed at the SSC RAS for the purpose of retrospective monitoring of geodynamic processes and early warning of seismic hazard.

Keywords: earthquakes in Turkey, seismic activity, GNSS measurements, Azov-Black Sea coast.

Funding. The work was carried out on the topic of the Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences “Study of Complex Natural and Man-made Processes Using the Block Element Method,” State Registration No. 122020100341-0, and the contract of Yuzhmorgeologiya JSC No. 01/2018-04-YuRTs (03) “Observation of geophysical and gas-hydrogeochemical fields within the Azov, Black Sea and Caspian coastal zones of the North Caucasus seismoactive region” and the Ministry of Education and Science, KubSU (project FZEN-2023-0006).

Cite as: Kalinchuk, V. V., Shestopalov, V. L., Alyoshin, B. N., Mukhin, A. S., Sheremetyev, V. M., Geodynamics of the Azov–Black Sea coast during the period of Turkish earthquakes in February–March 2023. *Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 18–27. DOI: 10.31429/vestnik-20-2-18-27

Received 16 June 2023. Revised 21 June 2023. Accepted 23 June 2023. Published 30 June 2023.

The authors declare no competing interests. Concept of work (V.V. Kalinchuk, B.N. Alyoshin), conducting experiments, calculations (V.L. Shestopalov, A.S. Mukhin), data analysis (V.L. Shestopalov, V.M. Sheremetyev), writing an article and making edits (V.V. Kalinchuk, B.N. Alyoshin, V.L. Shestopalov, V.M. Sheremetyev).

© The Author(s), 2023. The article is open access, distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) license.

Введение

Катастрофические землетрясения с магнитудами 7,8 и 7,5, произошедшие 6 февраля 2023 г. в провинциях Газиантеп и Кахраманмараш (Турция), вызвали значительные разрушения и гибель более 50 тысяч людей. В течение 24 часов после землетрясения магнитудой 7,8 было зафиксировано более 570 афтершоков, а три недели спустя их число превысило отметку в 10 000. Землетрясения произошли в юго-восточном районе, расположенном на пересечении трех геотектонических плит: Анатолийской, Аравийской и Африканской, — и ощущались на территории Израиля, Ирака, Ливана, Грузии, Армении, а также России. Для сейсмоактивных районов Азово-Черноморского побережья представляется актуальным оценить возможные последствия Турецкой сейсмической катастрофы в целях поисков прогнозных признаков в системах раннего предупреждения сейсмической опасности. Причиной землетрясений в Турции явилось движение тектонических плит, создающих давление на зоны разломов (границы) между ними. Равномерное скольжение плит по границам разломов нарушает сила трения, вызывая накопление напряжений в разломной зоне. Анатолийская плита (Anatolian Plate), на которой расположена Турция, смещается со скоростью 20–25 мм/год к западу под давлением Аравийской плиты (Arabian Plate), движущейся на север со скоростью 10–15 мм/год [1].



Рис. 1. Спутниковые геодинамические пункты и сейсмичность с 01.09.2022 по 01.06.2023

Fig. 1. Satellite geodynamic stations and seismicity from 09/01/2022 to 06/01/2023

На севере Аравийская плита ограничена конвергентной границей с Евразией (Eurasian Plate), инициируя поддвиг и субдукцию Восточно-Черноморской микроплиты под горные сооружения Кавказа. В такой геодинамической обстановке логично рассматривать движение тектонических блоков как основной источник возникновения напряжённости земной коры и выбрать методологию измерения этих движений.

1. Методика исследований

В качестве основного инструмента исследований был выбран метод спутниковой геодинамики, реализованный на базе сети 4-х спутниковых постоянно действующих геодинамических пунктов (СГП): Сочи, Лесное, Геленджик и Темрюк, — установленных в сейсмоактивных районах Азово-Черноморского побережья в 2012 г. Южным научным центром РАН (ЮНЦ РАН) и Южным научно-производственным объединением по морским геологоразведочным работам (АО «Южморгеология») в сотрудничестве с Кубанским государственным университетом (рис. 1).

За всё время наблюдений на СГП Геленджик, Лесное, Сочи (12 лет) и Темрюк (7 лет) получен тренд движения в горизонтальной плоскости и по высоте. В настоящей работе вычислялись движения СГП с 1921 г. по апрель 2023 г. и анализировались их плановые и высотные положения относительно тренда. Для обработки данных суточных измерений использовался пакет программ GAMIT (V 10.7) [2] и комплекс программ в среде Matlab, разработанный в ЮНЦ РАН.

2. Краткое описание тектонической обстановки

Тектонические напряжения, возникающие в процессе северного дрейфа Аравийской плиты, распространяются на тысячи километров и должны находить отражение в движении блоков земной коры Азово-Черноморского побережья. Рассмотрим движение тектонических блоков в эпицентральной зоне турецких землетрясений в феврале 2023 г. В этот период активизировался 150-километровый участок Восточно-Анатолийского глубинного разлома (East Anatolian Fault) со смещением до 3 м. Причиной геодинамической активности этого разлома, разделяющего

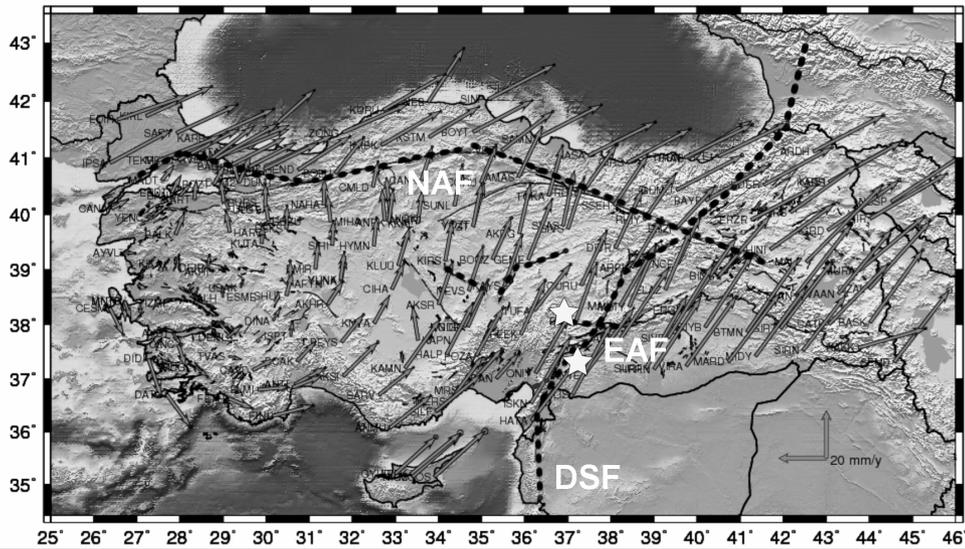


Рис. 2. Схема векторного поля скоростей территории Турции в координатной системе ITRF2005 по данным сети постоянных пунктов GNSS (TNPNGN-Active).
 NAF — Северо-Анатолийский разлом, EAF — Восточно-Анатолийский разлом, DSF — система разломов Мёртвого моря. Звёздочки — землетрясения 06.02.2023 г. [3]

Fig. 2. Scheme of the velocity vector field of the territory of Turkey in the ITRF2005 coordinate system according to the network of permanent GNSS points (TNPNGN-Active).
 NAF — North Anatolian Fault, EAF — East Anatolian Fault, DSF — Dead Sea Fault System.
 Asterisks — earthquakes 02/06/2023 [3]

щего Анатолийскую и Аравийскую плиты, является неравномерное движение его западного и восточного крыльев. На рис. 2 представлена схема векторного поля скоростей территории Турции, полученного по данным национальной сети пунктов GNSS (Global Navigation Satellite System) Турции (TNPNGN-Active) [3]. На основе кластерного анализа поля скоростей уверенно выделяются Евразийский и Аравийский блоки, которые отделены от Анатолийского блока разломами Северной и Восточной Анатолии [4].

Восточно-Анатолийский разлом (EAF) является вторым по сейсмоактивности разломом в Турции после Северо-Анатолийского разлома (NAF). В отличие от NAF, в районе которого зафиксировано 11 крупных землетрясений за последние ~ 75 лет, в течение того же периода времени EAF был относительно спокойным. Исторические данные показывают, что, несмотря на более низкую геодинамическую активность EAF по сравнению с NAF, этот разлом может генерировать достаточно сильные землетрясения. В последние годы использование GPS-технологий дало возможность детально изучить и количественно определить относительные смещения бортов EAF, что важно для понимания кинематики Анатолийской плиты [5]. Результаты GPS-наблюдений показывают, что скорость относительного смещения бортов в северной части EAF почти постоянна (10 мм/год) и затем уменьшается до 4,5 мм/год на юге, согласуясь с аналогичной скоростью 4,2 мм/год в северной части системы разломов Мертвого моря (DSF). Оценку энергии землетрясений E с учётом сдвига по разлому в 3 м можно получить из выражения [6]

$$E = 0,308 \frac{LdG}{H} \bar{u}^2, \quad (2.1)$$

где \bar{u} — средний сдвиг по разлому, см; L — длина разлома, см; d — глубина гипоцентра, см; $G = 5 \cdot 10^{11}$ дин/см² — модуль сдвига; H — расстояния ощутимых деформаций (в см) от среднего относительного перемещения на разрыве \bar{u} .

В книге Т. Рикитакэ для десятка японских и американских землетрясений приводятся графические зависимости убывания горизонтальных смещений, параллельных разрыву, по мере

удаления от него на расстояние H [7]. На основании этих результатов можно выразить аналитическую зависимость H от среднего относительного перемещения на разрыве \bar{u} в виде

$$H = (5\bar{u} + 1500) \cdot 10^3. \quad (2.2)$$

Вычислив потенциальную энергию накопленной деформации сдвига E по формуле (2.1) с учётом (2.2), можно определить магнитуду землетрясения из выражения [8]

$$\lg E = 1,5 \cdot M + 4,8 \text{ [Дж]}. \quad (2.3)$$

Для ЕАФ ($L = 150$ км, $d = 18$ км, $G = 5 \cdot 10^{11}$ дин/см², $\bar{u} = 3$ м) получаем $M = 7,5$, что близко к значениям магнитуд произошедших землетрясений ($M = 7,8$ и $M = 7,5$). Актуг и Ознер по данным сети TNPGN-Active измерили дефицит деформации сдвига на отдельных сегментах ЕАФ в 1,5 м и 5,2 м [5]. Расчёты (2.1)–(2.3) для этих значений сдвига дают оценку сейсмического потенциала $M = 7,1$ и $M = 7,8$.

3. Влияние сейсмических событий в Турции 06.02.2023 на территорию Краснодарского края

В последние годы развивается подход к решению задач геодинамики на основе единства сейсмического, вулканического и тектонического процессов, протекающих в блоковой геосреде и взаимодействующих между собой посредством геодеформационной волны, вызванной сезонными вариациями скорости вращения Земли [9, 10]. Влияние этих процессов отразилось на характере движения СГП Азово-Черноморского побережья. В период подготовки и прохождения сейсмических событий в Турции можно построить возможный сценарий развития геодинамической обстановки под влиянием тектонического процесса на основе схемы векторного поля скоростей территории Турции (рис. 2) [3], данных косейсмические движений пунктов сети TNPGN-Active [4] (рис. 3) и графиков движения сети СГП на Азово-Черноморском побережье (рис. 4, 5).

В обстановке сжатия 01.09.22 происходит землетрясения № 1 ($M = 3,7$) в 12 км к юго-востоку от Славянска и 31.12.22 событие № 2 ($M = 4,0$) в Чёрном море в 26 км к западу от Анапы. Мелкофокусное землетрясение ($M = 3,4$) на глубине 5 км происходит 20.12.22 в 6 км к юго-западу от побережья г. Сочи. После сейсмособытий в Турции 06.02.2023 и сброса напряжений вдоль ЕАФ с левосторонним сдвигом горизонтальные траектории СГП Темрюк и Геленджик начинают возвращаться к тренду. На графике вертикального движения СГП Геленджик с лета 2022 г. проявляется устойчивый бухтообразный спад что может быть вызвано вдавливанием кромки Евразийской плиты под воздействием Восточно-Черноморской и Анатолийской плит. Одновременно в этот же период на аналогичном графике СГП Темрюк преобладают волнообразные воздымания.

Горизонтальные движения СГП Лесное и Сочи повторяют в общих чертах движения пунктов Геленджик и Темрюк. После землетрясения в Турции 06.02.2023 на этих пунктах также фиксируется просадка по высоте

Аравийская плита двигаясь на север, северо-восток проскальзывает своим восточным крылом относительно западного блока по системе разломов ЕАФ. В какой-то момент относительное смещение блоков резко уменьшается и ЕАФ превращается в запертый разлом, накапливая потенциальную энергию сдвига. Западный блок Аравийской плиты, более сильно увлекаемый Восточным блоком, начинает оказывать давление на фронт расположенных севернее Черноморской и Евразийской плит. На графиках горизонтального движения СГП Геленджик и Темрюк с сентября 2022 г. отчётливо фиксируется смещение этих пунктов к северо-западу от тренда (рис. 4, 5).

После катастрофических землетрясений в Турции наблюдается нарастание геодинамической активности в Черноморско-Каспийской области. Глубокофокусное событие с магнитудой 4,4 происходит 27.02.2023 у берегов Крыма в 19 км к юго-западу от Алушты. В марте фиксируется более 20 афтершоков у побережья Турции. Происходит 19 землетрясений в Грузии, 7 — в Дагестане, 3 землетрясения — в Армении и Чечне, 2 сейсмособытия в Ставропольском

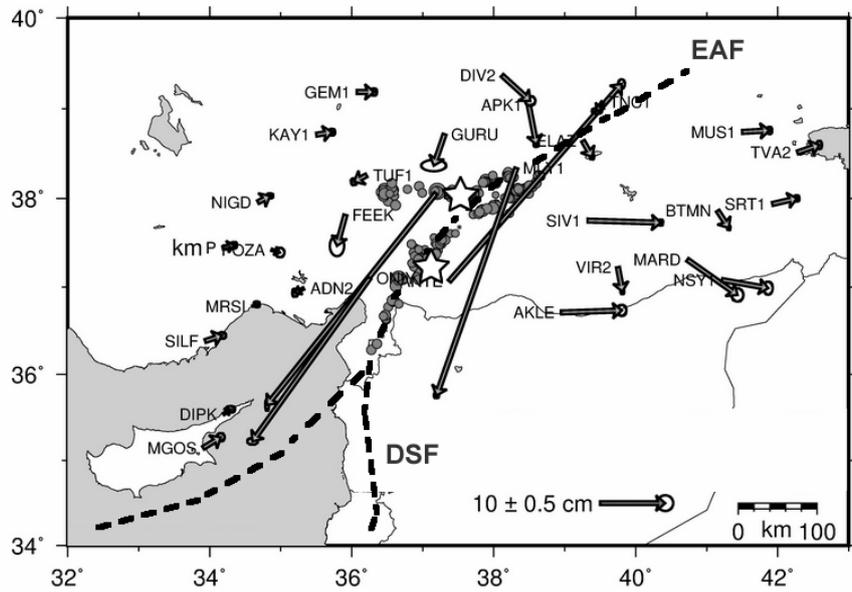


Рис. 3. Косейсмические движения на территории Турции по данным сети постоянных пунктов GNSS (TNPNGN-Active). EAF — Восточно-Анатолийский разлом, DSF — разлом Мёртвого моря. Звёздочки — землетрясения 06.02.2023 г. [4]

Fig. 3. Coseismic movements in Turkey according to the network permanent GNSS points (TNPNGN-Active). EAF — East Anatolian Fault, DSF — Dead Sea Fault. Asterisks — earthquakes 02/06/2023 [4]

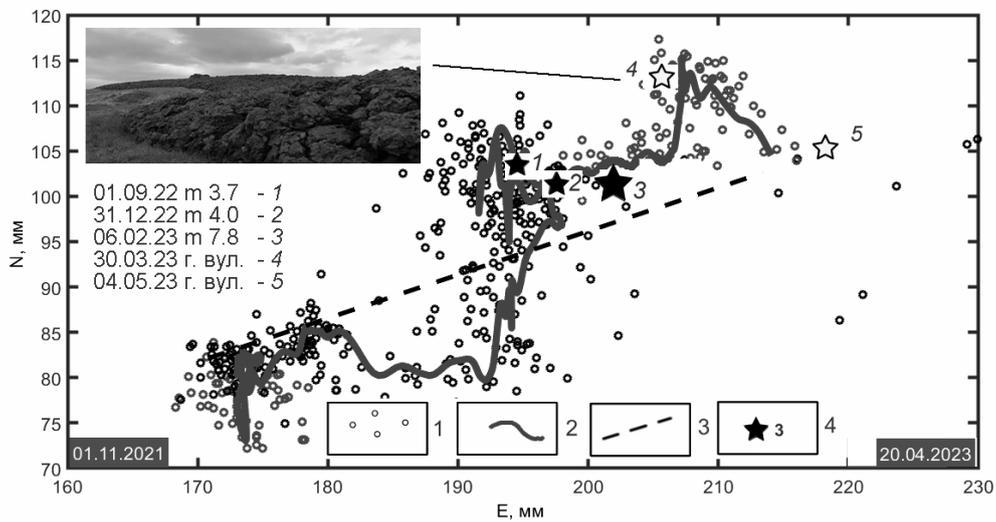


Рис. 4. Движение СГП Темрюк в горизонтальной плоскости в 2021–2023 гг.

1 — исходные точки суточных измерений, 2–3 — траектория движения: 2 — сглаженная кубическим сплайном, 3 — средний многолетний тренд; 4 — время и магнитуда ближайших землетрясений с 01.09.22. Белые звёздочки — извержение грязевых вулканов; 4 — Карабетова гора, 5 — Шуго

Fig. 4. The movement of the SGS Temryuk in the horizontal plane in 2021–2023
1 — initial points of daily measurements, 2–3 — movement trajectory: 2 — smoothed by cubic spline, 3 — average long-term trend; 4 — time and magnitude of the nearest earthquakes from 01.09.22. White stars — eruption of mud volcanoes; 4 — Karabetova Gora, 5 — Shugo

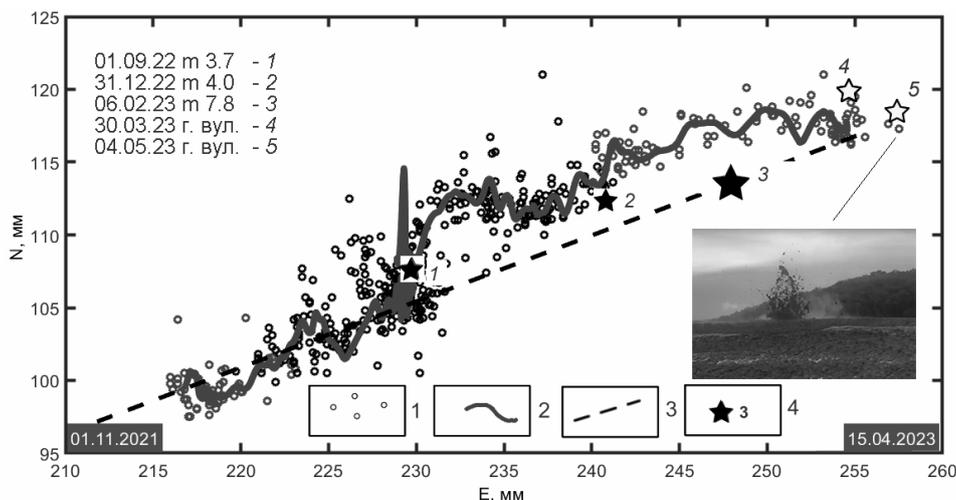


Рис. 5. Движение СГП Геленджик в горизонтальной плоскости в 2021–2023 гг. Обозначения соответствуют рис. 4

Fig. 5. The movement of the SGS Gelendzhik in the horizontal plane in 2021–2023. The designations here as in Fig. 4

крае. В районе Туапсинской поперечной зоны разломных нарушений 13, 14 и 29 мая 2023 г. происходит рой мелкофокусных землетрясений ($M = 3,2 \div 3,6$). В непосредственной близости от портовых сооружений г. Туапсе 25.05.2023 за одни сутки произошли 4 землетрясения ($M = 3,6 \div 4,2$) на глубине от 10 до 5 км (рис. 1). На территории Таманского полуострова 30.03.2023 и 04.05.2023 началось извержение грязевых вулканов на Карабетовой горе и Шуго соответственно. Вулкан на Карабетовой горе расположен в начале осевой части грязевулканической области протяжённостью 20 км, в четырёх километрах восточнее станции Тамань. Вулкан Шуго находится в пределах Ахтырской флексурно-разрывной зоны к югу от станции Варениковская. Можно предположить, что активизация этих вулканов связана с ростом тектонических напряжений в земной коре Керченско-Таманской области.

При анализе геодинамических процессов, вызванных турецкими землетрясениями, необходимо учитывать также влияние геодеформационной волны, вызванной сезонными вариациями скорости вращения Земли. Связь сильных землетрясений с геодеформационной волной сезонной периодичности подтверждается многолетними наблюдениями за миграцией очагов землетрясений и динамикой проявления глобальных и региональных геодинамических процессов, сопровождающихся катастрофическими последствиями [9, 10]. Изменение ротационного режима планеты порождает волну перемещения флюидных масс и деформацию горных пород, которые в тектонических нарушениях превышают критические значения и вызывают разрушение пород с высвобождением сейсмической энергии. На рис. 6 представлен график выделения сейсмической энергии в годовом цикле в основных сейсмоактивных районах СССР [10].

Зависимость положения максимума амплитуды геодеформационной волны сезонной периодичности в Северном полушарии от широты пункта наблюдения показана на рис. 7. На этот график, построенный по материалам [10], в координатах широты и времени нанесены отметки Турецких землетрясений 2023 г. и извержения грязевых вулканов на Таманском полуострове (30.03.2023 и 04.05.2023).

Анализ графиков на рис. 6 и 7 показывает устойчивую приуроченность сейсмической и вулканической активности к времени прохождения геодинамической волны, вызванной изменением ротационного режима Земли. Проходя 06.02.2023 зоны ЕАФ с высоким сейсмическим потенциалом ротационная волна провоцирует землетрясения и распространяясь далее в меридиональном направлении вызывает активизацию сейсмичности на Кавказе и извержения грязевых вулканов на Таманском полуострове.

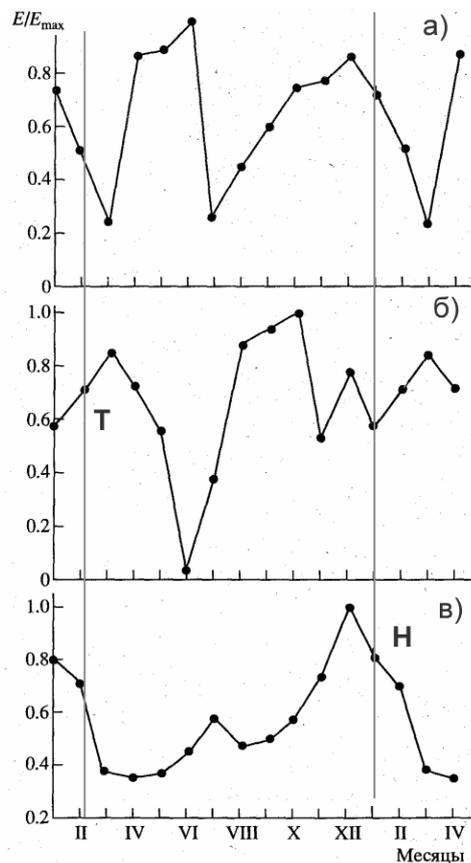


Рис. 6. Выделения сейсмической энергии в годовом цикле в основных сейсмоактивных районах СССР (по материалам [10]): а) Кавказ; б) Средняя Азия и Казахстан; в) Камчатка. Время землетрясений: Т — Турция (06.02.2023), Н — Нефтегорск (27.05.1995)

Fig. 6. Seismic energy releases in the annual cycle in the main seismically active regions of the USSR (based on [10]): а) Caucasus; б) Central Asia and Kazakhstan; в) Kamchatka. Earthquake time: Т – Turkey (02/06/2023), Н – Neftegorsk (05/27/1995)

Время реакции геологической среды Черноморского побережья на сейсмические события в Турции можно оценить также по скорости распространения глобальной деформационной волны, полученной по результатам исследований явления миграции эпицентров землетрясений со скоростями 10–100 км/год, зафиксированными в различных регионах Земли [12, 13]. Для Черноморского побережья, расположенного на расстоянии 800 км от эпицентров турецких землетрясений, проявление геодинамической активности можно ожидать через 8–80 лет. В работе [14] предложена ротационная модель сейсмического процесса, согласно которой нелинейная волна деформации может распространяться со скоростью до 6000 км/год и достигнуть Черноморское побережье Краснодарского края через 1,6 мес.

Выводы и обсуждение

Проведенный анализ даёт возможность сделать следующие выводы:

1. Предложен сценарий развития геодинамических процессов на территории Турции и Азово-Черноморского побережья с учётом движения Аравийской плиты и ротационных эффектов неравномерного вращения Земли. Эффект запертого разлома ЕАФ проявился в нарастающем давлении Анатолийской плиты на северный борт Чёрноморской впадины и смещении СГП Геленджик, Темрюк, Сочи и Лесное к северо-западу от тренда. После турецких сейсмособытий 06.02.2023 на территории Краснодарского края наблюдается проседание геодинамических

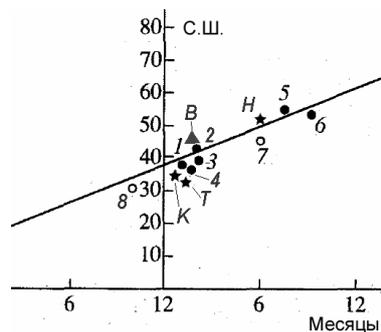


Рис. 7. Зависимость положения максимума амплитуды геодинамической волны сезонной периодичности в Северном полушарии от широты пункта наблюдения (по материалам [10]). Цифры — пункты режимных эманационных наблюдений, по которым определялось прохождение сезонных деформационных волн: 1 — Джермук (Армения); 2 — полигон ИВТАН (Киргизия); 3 — Ленинабад (Северный Таджикистан); 4 — Гарм (Южный Таджикистан); 5 — Москва; 6 — Ключи (Камчатка); 7 — Будапешт (Венгрия); 8 — Александрия (Египет); два последних пункта получены по литературным данным. Звездочки — моменты землетрясений: К — г. Кобе (Япония); Н — Нефтегорск (Северный Сахалин); Т — Турецкие землетрясения (06.02.2023 г.); В — Извержение грязевых вулканов на Таманском полуострове (30.03.2023 и 04.05.2023)

Fig. 7. Dependence of the position of the maximum amplitude of the geodeformational wave of seasonal periodicity in the Northern Hemisphere on the latitude of the observation point (from [10]). Numbers is points of regime emanation observations, by which the passage of seasonal deformation waves was determined: 1 – Jermuk (Armenia); 2 – IVTAN test site (Kyrgyzstan); 3 – Leninabad (Northern Tajikistan); 4 – Garm (Southern Tajikistan); 5 – Moscow; 6 – Keys (Kamchatka); 7 – Budapest (Hungary); 8 – Alexandria (Egypt); the last two points were obtained from the literature data. Asterisks – moments of earthquakes: K – city Kobe (Japan); H – Neftegorsk (Northern Sakhalin); T – Turkish earthquakes (02/06/2023); B – Eruption of mud volcanoes on the Taman Peninsula (03/30/2023 and 05/04/2023)

пунктов по высоте что указывает на релаксацию напряжений всего ансамбля тектонических блоков.

2. Оценка магнитуды ожидаемых землетрясений в районе ЕАФ, вычисленная согласно (2.1)–(2.3) по данным предельных деформаций сдвига, полученных в сети TNPGN-Active [5] (1,5 и 5,2 м), составила 7,1 и 7,5 что близко к значениям магнитуд произошедших землетрясений 7,5 и 7,8.

3. Оценка времени проявления геодинамической активности на исследуемой территории с момента прохождения турецких землетрясений 06.02.2023 на основе эмпирической модели миграции эпицентров землетрясений составляет от 8 до 80 лет. При реализации ротационной модели сейсмического процесса с учётом нелинейного характера деформационной волны аналогичная оценка времени проявления геодинамического эффекта составляет 1,6 мес., что подтверждается усилением сейсмичности на Кавказе и активизацией грязевых вулканов на Таманском полуострове весной 2023 г.

4. Представляет интерес использовать непрерывные наблюдения на пунктах GNSS TNPGN-Active (в первую очередь ANTE, ONIY, MLT1 и EKZ1) за период 2016–2023 гг. для определения интегрального критерия напряжённости земной коры по методологии, разработанной в ЮНЦ РАН [15], с целью ретроспективного мониторинга геодинамических процессов и раннего предупреждения сейсмической опасности.

Нельзя также недооценивать и локальные явления, связанные с постоянными периодическими воздействиями на литосферные плиты, как на деформируемые механические объекты. Недавно установленные новые предвестники землетрясений [16], вызываемые резонансами и усталостными состояниями деформируемых литосферных плит, также могут вносить коррективы в состояние сейсмичности региона. Эти вопросы в настоящее время находятся в детальном исследовании новыми математическими методами моделирования.

Литература [References]

1. Bulbul, S., Inal, C., Yildirim, O., Basciftci F., Velocity Estimation of Turkish National Permanent GNSS Network- Active Points Located at Central Anatolia Region. *Bilge International Journal of Science and Technology Research*, 2017, vol. 1 (Special Issue), pp. 18–25. URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bilgesci/issue/33311/350341> (дата обращения: 20.04.23).
2. Herring, T.A., King, R.W., Floyd, M.A., McClusky, S. *GAMIT Reference Manual Release 10.7*, 2018, URL: http://geoweb.mit.edu/gg/GAMIT_Ref.pdf (дата обращения: 04.05.22).
3. Özdemir, S., Cingöz, A., Aktuğ, B., Lenk, O., Kurt, M., Sabit GNSS İstasyon Verilerinin Analizi. URL: <https://silo.tips/download/sabit-gnss-stasyon-verilerinin-analizi-zdemir-s-cingz-a-aktu-b-lenk-o-kurt-m> (дата обращения: 20.04.23).
4. Özdemir S., Karshoğlu M.O. Soft clustering of GPS velocities from a homogeneous permanent network in Turkey. *J. Geod.*, 2019, vol. 93, pp. 1171–1195. DOI: [10.1007/s00190-019-01235-z](https://doi.org/10.1007/s00190-019-01235-z)
5. Aktug, B., Ozener, H., Dogru, A., Sabuncu, A., Turgut, B., Halicioğlu, K., Yilmaz, O., Havazli, E., Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault System using an improved GPS velocity field. *Journal of Geodynamics*, 2016, vol. 94–95, pp. 1–12. DOI: [10.1016/j.jog.2016.01.001](https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.01.001) EDN: WVIJAT
6. Хачиян, Э.Е., Саргсян, А.З., О потенциальной энергии среды в период подготовки сильного землетрясения. *Известия НАН РА. Науки о Земле*, 2005, № 3, с. 37–45. [Xachiyani, E.E., Sargsyan, A.Z., About the potential energy of the environment during the preparation of a strong earthquake. *Izvestiya NAN RA. Nauki o Zemle = Bull. of National Academy of Sciences of Republic of Armenia. Earth Sciences*, 2005, № 3, pp. 37–45.]
7. Рикитакe, Т., *Предсказание землетрясений*. Мир, Москва, 1979. [Rikitake, T., *Predskazanie zemletryaseniy = Earthquake prediction*. Mir, Moscow, 1979. (in Russian)]
8. Садовский, М.А., Болховитинов, Л.Г., Писаренко, В.Ф., *Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс*. Наука, Москва, 1987. [Sadovskij, M.A., Bolhovitinov, L.G., Pisarenko, V.F., *Deformirovanie geofizicheskoy sredy i seysmicheskij protsess = Geophysical Environment Deformation and Seismic Process*. Nauka, Moscow, 1987. (in Russian)]
9. Vikulin, A.V., Akmanova, D.R., Vikulina, S.A., Dolgaya, A.A., Migration of seismic and volcanic activity as display of wave geodynamic process. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2012, vol. 3, № 1, pp. 1–18. DOI: [10.5800/GT-2012-3-1-0058](https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-1-0058)
10. Рудаков, В.П., Геодинамические предпосылки Нефтегорского землетрясения 27 мая 1995 года, *Доклады РАН*, 1995, т. 345, № 6, с. 819–822. [Rudakov, V.P., Geodynamic prerequisites of the Neftogorsk earthquake on May 27. *Doklady RAN = Rep. of the Russian Academy of Sciences*, 1995, vol. 345, no. 6, pp. 819–822. (in Russian)]
11. Earthquake sequence in Turkey, February 6th 2023. *CSEM & EMSC*. URL: www.emsc-csem.org/Earthquake/271/Earthquake-sequence-in-Turkey-February-6th-2023 (дата обращения: 04.05.22).
12. Касахара, К., *Механика землетрясений*. Мир, Москва, 1985. [Kasahara K. *Earthquake mechanics*. Mir, Moscow, 1985. (in Russian)]
13. Mogi, K., Migration of seismic activity. *Bull. of Earthquake Research Institute*, 1968, vol. 46, pp. 53–74.
14. Викулин, А.В., Быков, В.Г., Лунева, М.Н., Нелинейные волны деформации в ротационной модели сейсмического процесса. *Вычислительные технологии*, 2000, т. 5, № 1, с. 31–39. [Vikulin, A.V., By'kov, V.G., Luneva, M.N., Nonlinear strain waves in the seismic process rotational model. *Computing technologies*, 2000, vol. 5, no. 1, pp. 31–39. (in Russian)]
15. Бабешко, В.А., Калинчук, В.В., Шестопалов, В.Л., Интегральный признак напряженно-деформированного состояния среды по данным GNSS-наблюдений. *Наука Юга России*, 2020, т. 16, № 1, с. 3–10. [Babeshko, V.A., Kalinchuk, V.V., Shestopalov, V.L., Integrated indicator of stressed-strain state of the earth's crust from GNSS-observations. *Science of the South of Russia*, 2020, vol. 16. no. 1. pp. 3–10. (in Russian)]
16. Евдокимова, О.В., Бабешко, В.А., Евдокимов, В.С., Бабешко, О.М., Зарецкая, М.В., Шестопалов, В.Л., Об одном резонансном подходе к оценке состояния сейсмичности. *Наука Юга России*, 2023, т. 19, № 1, с. 3–10. [Evdokimova, O.V., Babeshko, V.A., Evdokimov, V.S., Babeshko, O.M., Zareczkaya, M.V., Shestopalov, V.L., On one resonant approach to assessing the state of seismicity. *Science of the South of Russia*, 2023, vol. 19. no. 1. pp. 3–10. (in Russian)]