УДК 550.34.013.4, 551.24, 551.2.03
DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001

Оригинальная статья

Геодинамика, геотермия и сейсмичность Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона и землетрясение в Мраморном море (Турция) 23 апреля 2025 года

В.Б. Свалова

Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия, 101000, г. Москва, Уланский пер., 13, стр. 2, e-mail: v-svalova@mail.ru;

Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а

Статья поступила: 30.06.2025, доработана: 10.09.2025, принята к публикации: 12.09.2025

Резюме: Актуальность работы. 23 апреля 2025 года в Мраморном море произошло землетрясение магнитудой M 6,2. Каждое новое сильное землетрясение дает дополнительную информацию о сейсмичности в регионе и позволяет уточнить прогноз и предупреждение последующих возможных разрушительных событий. Распространение сильных землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, имеющее определенную закономерность, делает землетрясение в Мраморном море важным звеном в этой цепочке и дает новый материал для анализа сейсмичности в окрестности Стамбула. **Целью исследования** является анализ и выявление соотношения и взаимосвязи землетрясения 2025 года в Мраморном море с сильными землетрясениями вдоль Северо-Анатолийского разлома 1939–1999 годов, а также с более ранними историческими землетрясениями в регионе Стамбула 1509 и 1766 годов. **Методами исследования** являются построение геодинамических и геотермических моделей глубинного строения регионов стихийных бедствий и катастроф и сравнительный анализ имеющихся геолого-геофизических данных региона активных континентальных окраин и сейсмогенерирующих разломов. **Результаты исследования.** Реализуются два механизма достижения предела прочности пород на глубине для формирования очага землетрясения. Это активизация сейсмогенерирующих разломов вследствие горизонтального движения литосферных плит и вертикальный подъем вещества в виде мантийных диапиров вследствие гравитационной неустойчивости. Сильные землетрясения, распространяющиеся вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, преодолели окрестности Стамбула и продвигаются дальше на запад к Эгейскому морю, свидетельством чего может служить землетрясение 2025 года западнее Стамбула, что может говорить о снижении сейсмического риска для Стамбула в ближайшее время в плане горизонтальных движений по разлому. В то же время опасность от возможного сильного землетрясения по типу исторических землетрясений с периодом 250 лет (1509 г., 1766 г.) остается высокой. Такое землетрясение в окрестности Стамбула может произойти в течение ближайших нескольких лет.

Ключевые слова: стихийные бедствия, землетрясения, геодинамика, сейсмичность, геотермия, Кавказ, Турция, моделирование, сейсмотомография, прогноз.

Для цитирования: Свалова В.Б. Геодинамика, геотермия и сейсмичность Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона и землетрясение в Мраморном море (Турция) 23 апреля 2025 года. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(3): 8-23. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001

Original paper

Geodynamics, geothermics and seismicity of the Caucasus-Anatolian-Arabian region and the earthquake in the Sea of Marmara (Turkey) on 23 April 2025

V.B. Svalova

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
13 Ulansky lane, 2 p., Moscow 101000, Russian Federation,
e-mail: v-svalova@mail.ru;

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 30.06.2025, revised: 10.09.2025, accepted: 12.09.2025

Abstract: Relevance. On 23 April 2025, an earthquake with a magnitude of M 6.2 occurred in the Sea of Marmara. Each new strong earthquake provides additional information about seismicity in the region and makes it possible to refine the forecast and prevention of subsequent possible destructive events. The propagation of strong earthquakes along the North Anatolian Fault from east to west, which has a certain pattern, makes the earthquake in the Sea of Marmara an important link in this chain and provides new material for the analysis of seismicity in the vicinity of Istanbul. **Aim of the study is** to analyze and identify the relationship and interrelationship of the 2025 Marmara earthquake with the strong earthquakes along the North Anatolian Fault of 1939-1999, as well as with the earlier historical earthquakes of 1509 and 1766 in the Istanbul region. **Research methods** are the construction of geodynamic and geothermal models of the deep structure of regions of natural disasters and catastrophes and a comparative analysis of available geological and geophysical data of the region of active continental margins and seismogenic faults. **Results.** There are two mechanisms for achieving the ultimate strength of rocks at depth to form an earthquake source. These are the activation of seismogenic faults due to the horizontal movement of lithosphere plates and the vertical rise of matter in the form of mantle diapirs due to gravitational instability. Strong earthquakes propagating along the North Anatolian Fault from east to west have passed the vicinity of Istanbul and are moving further west towards the Aegean Sea, as may be witnessed by the earthquake of 2025 west of Istanbul, which may indicate a decrease in the seismic risk for Istanbul in the near future in terms of horizontal movements along the fault. At the same time, the hazard from a possible strong earthquake of the type of historical earthquakes with a period of 250 years (1509, 1766) remains high. Such an earthquake in the vicinity of Istanbul may occur within the next few years.

Keywords: natural disasters, earthquakes, geodynamics, seismicity, geothermy, Caucasus, Turkey, modeling, seismic tomography, forecast.

For citation: Svalova V.B. Geodynamics, geothermics and seismicity of the Caucasus-Anatolian-Arabian region and the earthquake in the Sea of Marmara (Turkey) on 23April 2025. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(3): 8-23. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001

Введение

Сейсмичность Турции

23 апреля 2025 года в 12:49:10 по местному времени (UTC+3:00) в Мраморном море произошло землетрясение магнитудой M 6,2. Его эпицентр находился в 21 км

к юго-востоку от района Мармара-Эреглиси, провинция Текирдаг, Турция, в 73 км к юго-западу от Стамбула, с координатами 40°49′58″ с. ш. 28°13′36″ в. д.

По данным отчета Стамбульского технического университета (İTÜ), землетрясение длилось 13 секунд и вызвало 291 афтершок. Смещение плит составило всего 30 см – значительно меньше ожидаемых 3,7 метра. Афтершоки распределились вдоль полосы 40 × 12 км, достигая глубины до 30 км.

Максимальная оценка интенсивности по модифицированной шкале Меркалли достигла VII (очень сильное). По разным источникам, глубина залегания очага составила от 10 до 16,9 км. Этому толчку предшествовало землетрясение магнитудой 3,9, которое было зафиксировано в 12:13 в Мраморном море, недалеко от города Силиври.

Вслед за ним последовали еще три толчка, включая основной магнитудой M 6,2. Еще два землетрясения произошли в районе Бююкчекмедже (41°01′12″N 28°34′39″E) с интервалом в 11 минут. Их магнитуда составила 4,4 и 4,9 соответственно.

По данным Геологической службы США, около 188 000 человек подверглись воздействию сотрясений интенсивности VII. Сотрясения интенсивности VI (сильные) ощутили около 2,28 миллиона человек, в основном в западных районах провинции Стамбул. Сотрясения интенсивности IV (умеренные) были зарегистрированы в центральных частях городов Стамбул и Бурса, а также в Эвросе (Греция) и в городах Бургас и Ямбол (Болгария). Сообщения о толчках поступили из таких удалённых районов, как Газиантеп, Бухарест (Румыния) и София (Болгария). По меньшей мере, 359 человек получили травмы в результате массовой паники, когда прыгали с высоты, в том числе 236 человек в Стамбуле. В районе Фатих обрушилось заброшенное трёхэтажное здание. Были зафиксированы повреждения нескольких зданий и перебои с интернетом в отдельных районах Стамбула. В Мраморноморском регионе было развёрнуто, по меньшей мере, 3597 спасателей, в том числе 1443 в Стамбуле, а также 250 единиц техники.

Город Стамбул с населением около 16 миллионов человек, когда-то столица Византийской и Османской империй, расположен в опасной близости от Северо-Анатолийского разлома, который проходит в 20 километрах (12,4 мили) к югу от Стамбула через Мраморное море. Т.к. территория Турции почти полностью расположена на линиях сейсмических разломов, каждый год там происходят тысячи землетрясений различной магнитуды.

В 2024 году Управление по чрезвычайным ситуациям и стихийным бедствиям Турции зарегистрировало более 30 400 подземных толчков. Годом с наибольшим количеством зафиксированных землетрясений стал 2023 год, когда было зарегистрировано более 74 тысяч подземных толчков.

Землетрясение магнитудой 7,8 произошло на юго-востоке Турции 6 февраля 2023 года в 04:17 по местному времени. [Svalova, 2023; Вольфман, Колесникова, 2023; Геодакян и др., 2023, 2024; Свалова, Заалишвили, 2024б]. Эпицентр находился в 37 км к западу-северо-западу от Газиантепа. По данным Геологической службы США, гипоцентр землетрясения находился на глубине 10,0 км. За землетрясением последовало землетрясение магнитудой 7,7 в 13:24. Это землетрясение произошло в 95 км к северо-северо-востоку от первого.

Землетрясение магнитудой 7,8 является крупнейшим в Турции наряду с землетрясением той же магнитуды в Эрзинджане 1939 года. Подтверждено более 52 800 смертей: более 46 100 в Турции и более 6 700 в Сирии. Это самое смертоносное сти-

хийное бедствие в современной истории Турции. Землетрясения причинили ущерб на сумму более 100 миллиардов долларов США.

За последнее столетие страна пережила тысячи подземных толчков, из которых 17 были магнитудой выше семи. Землетрясение в Эрзинджане 1939 года, получившее название Великое Эрзинджанское землетрясение, стало одним из самых разрушительных в истории Турции. Оно произошло 27 декабря в 1:57 по местному времени, с магнитудой 7,8 и продолжительностью толчков около 52 секунд в восточной провинции Эрзинджан, в результате чего погибло около 33 тысяч человек и 100 000 человек получили ранения. Землетрясение, разрушившее около 116 000 зданий, считается одним из крупнейших в мире.

В 1999 году произошли землетрясения в Измите (Гёльчукское) и Дюздже 17 августа и 12 ноября соответственно. Землетрясение с центром в Козджаэли / Гёльчук произошло в 03:02 утра 17 августа 1999 года магнитудой M 7.4–7.6. Это самое сильное землетрясение за последние годы, повлекшее за собой огромные человеческие жертвы и материальные потери. По официальным данным, около 18 тысяч человек погибли и около 25 тысяч получили ранения. По неофициальной информации, около 50 000 человек погибли и около 100 000 получили ранения. Это землетрясение – одно из крупнейших землетрясений прошлого века с точки зрения силы и ущерба. Землетрясение 17 августа ощущалось во всем Мраморноморском регионе, на обширной территории от Анкары до Измира.

Между 1939 и 1999 годами серия разрушительных сдвиговых землетрясений магнитудой M 7+ распространилась на запад вдоль зоны Северо-Анатолийского разлома, начиная с землетрясения M 7.8 в Эрзинджане в 1939 году на восточном конце системы Северо-Анатолийского разлома и до землетрясения M 7.4–7.6 в Измите в 1999 году у границ Мраморного моря [Ambraseys, Jackson, 2000; Bohnhoff et al., 2013; Stein, Sevilgen, 2025].

Северо-Анатолийский разлом, первый по величине сдвиговый разлом в Турции, вызвал 11 крупных землетрясений в 20 веке. Вдоль Северо-Анатолийского разлома сильные землетрясения происходят каждые 1–10 лет (1939, 1942, 1943, 1944, 1953, 1957, 1966, 1967, 1971, 1992, 1999) с расстоянием между гипоцентрами около 100 км в направлении с востока на запад (рис. 1).

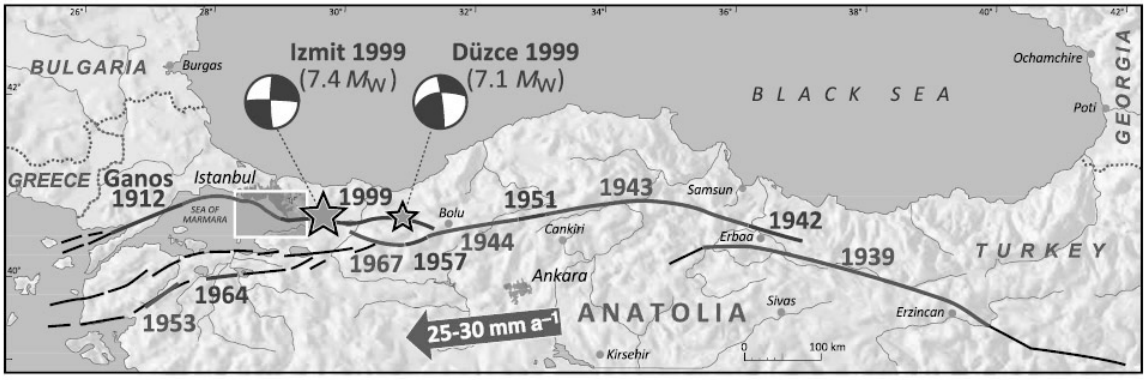

Рис. 1. Северо-Анатолийский разлом и землетрясения 1939–1999 годов [Bohnhoff et al., 2013] / Fig. 1. North Anatolian Fault and earthquakes of 1939–1999 [Bohnhoff et al., 2013]

Турция расположена в сейсмоопасной зоне, ее территорию пересекает активная Северо-Анатолийская зона разломов (САЗР), которая разделяет Евразийскую и Анатолийскую тектонические плиты, скользящие относительно друг друга со ско-

ростью 2 см в год. Вдоль нее постоянно происходят землетрясения, и активность постепенно смещается все дальше на запад, в Мраморное море, в сторону Стамбула. Сегмент этой зоны, примыкающий к городу, не активировался 250 лет.

Историческое Стамбульское (Константинопольское) землетрясение произошло в районе Босфора и Мраморного моря 10 сентября 1509 г. Эпицентр имел координаты 40°54′ с. ш. 28°42′ в. д. Магнитуда землетрясения составила 7,2 ± 0,3. Из-за тяжёлых последствий оно получило название Малый Конец Света (или Землетрясение Судного дня). Султан Баязид II был вынужден перенести столицу в город Эдирне на несколько месяцев. По разным оценкам, погибло от 4000 до 10 000 человек.

Землетрясение нанесло большой ущерб Стамбулу (Мечеть Фатих, Дворец Топкапы, квартал Галаты) и крепостям вдоль Босфора. От подземных толчков и возникшего цунами высотой до 6 метров также пострадали Принцевы острова.

Одно из самых разрушительных землетрясений в истории Османской империи произошло 22 мая 1766 г. Два сильных подземных толчка произошли в районе Стамбула. Первое землетрясение с предполагаемой магнитудой 7,1 с эпицентром 40°48′N 29°00′E / 40.8°N 29°E произошло в восточной части Мраморного моря, во впадине Чынарджык около Принцевых островов. Погибли от 4000 до 5000 человек. В результате двухминутного землетрясения было разрушено множество зданий. Афтершоки, последовавшие за землетрясением, продолжались 3 месяца. Мечеть Фатих, построенная в 1463 году Султаном Мехмедом II, известным как Фатих (Завоеватель), была полностью разрушена.

Сильные исторические землетрясения 1509 и 1766 годов около Стамбула дали основание предполагать, что период повторяемости сильных землетрясений здесь составляет 250 лет.

Сейсмичность Мраморного моря

Каждое новое сильное землетрясение дает дополнительную информацию о сейсмичности в регионе и позволяет уточнить прогноз и предупреждение последующих возможных разрушительных событий. Распространение сильных землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, имеющее определенную закономерность, делает землетрясение в Мраморном море очень важным звеном в этой цепочке и дает новый материал для анализа сейсмичности в окрестностях Стамбула (рис. 2).

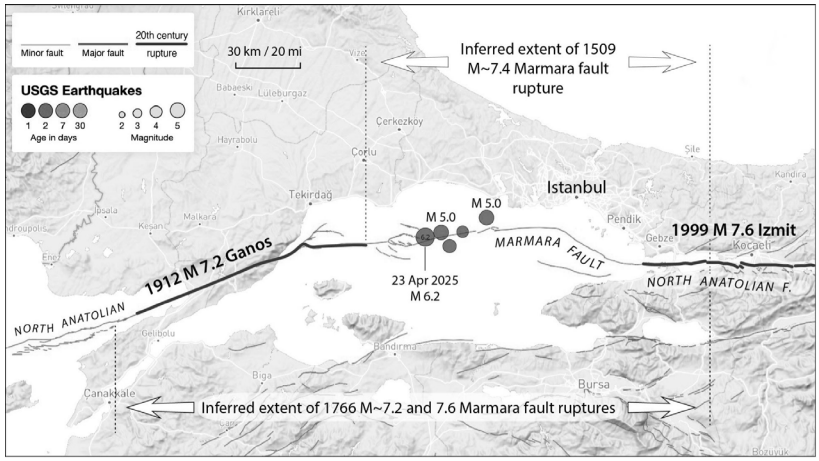

Рис. 2. Землетрясение в Мраморном море 23-4-2025 /

Fig. 2. Earthquake in the Marmara Sea 23-4-2025 (https://temblor.net/earthquake-insights/a-magnitude-6-2-quake-strikes-the-marmara-fault-at-site-of-large-historic-earthquakes-near-istanbul-16755/)

Важно понять и исследовать, как землетрясение 2025 года в Мраморном море соотносится с сильными землетрясениями вдоль Северо-Анатолийского разлома 1939–1999 гг., а также с более ранними историческими землетрясениями, которые нанесли сильные разрушения Стамбулу и вызвали большие человеческие жертвы.

Для этого необходимо детально проанализировать сейсмичность Мраморного моря, а также глубинную геодинамику и геотермию всего Анатолийско-Кавказского и окружающих регионов.

Основные землетрясения в регионе Мраморного моря представлены в таблице 1 и на рисунке 3.

Таблица 1 / Table 1

Землетрясения в регионе Мраморного моря за период 1500–1999 гг. с магнитудой M≥ 6,0. Список является полным для землетрясений с M≥ 6,8, но не для более слабых событий [Ambraseys, Jackson, 2000] / Earthquakes in the Marmara region for the period 1500–1999 with magnitude M≥ 6.0. The list is complete for earthquakes with M≥ 6.8, but not for weaker events [Ambraseys, Jackson, 2000]

Year	Date	Time	Lat.	Long.	M
1509	9-10	22:00	40.9	28.7	7.2
1556	5-10	24:00	40.3	27.8	7.2
1719	5-25	12:00	40.7	29.8	7.4
1737	3-6	07:30	40.1	27.3	7.0
1754	9-2	03:30	40.8	29.2	6.8
1766	5-22	05:00	40.8	29.0	7.1
1766	8-5	05:30	40.5	26.6	7.4
1809	2-7	00:00	40.0	27.0	6.1
1826	2-8	20:30	39.8	26.4	6.2
1841	10-6	02:30	40.85	29.05	6.1
1850	4-19	23:30	40.1	28.3	6.1
1855	2-28	02:30	40.1	28.6	7.1
1855	4-11	19:40	40.2	28.9	6.3
1859	8-21	11:30	40.3	26.1	6.8
1860	8-22	10:09	40.5	26.0	6.1
1893	2-9	17:16	40.5	26.2	6.9
1894	7-10	12:24	40.7	29.6	7.3
1912	8-9	01:28	40.7	27.2	7.3
1912	8-10	09:23	40.8	27.5	6.2
1912	9-13	23:31	40.7	27.0	6.8
1935	1-4	14:41	40.50	27.60	6.4
1935	1-4	16:20	40.55	27.75	6.3
1943	6-20	15:32	40.68	30.48	6.4
1944	10-6	02:34	39.7	26.5	6.8
1953	3-18	19:06	40.0	27.4	7.1
1956	2-20	20:31	39.84	30.41	6.2
1957	5-26	06:33	40.6	31.0	7.2
1963	9-18	16:58	40.70	28.95	6.4
1964	10-6	14:31	40.1	28.2	6.8
1967	7-22	16:57	40.7	30.7	7.2
1975	3-27	05:15	40.45	26.12	6.5
1983	7-5	12:01	40.28	27.76	6.1
1999	8-17	00:01	40.7	30.0	7.4

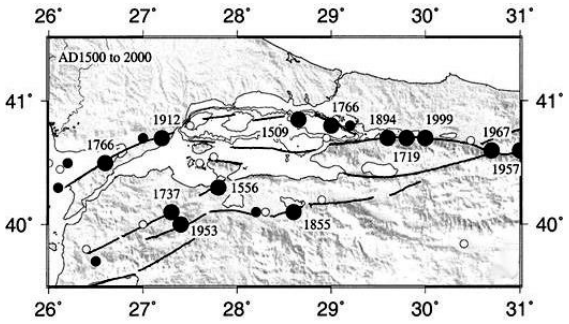

Рис. 3. Землетрясения в регионе Мраморного моря за период 1500–1999 гг. с магнитудой M≥ 6,0. Основные землетрясения в регионе Мраморного моря из Таблицы 1. Большие черные круги – события с M ≥ 7,0, маленькие черные круги – с 7,0 > M ≥ 6,6, а белые круги – с 6,6 > M ≥ 6,0. Только те, у которых M ≥ 7,0, помечены датами [Ambraseys, Jackson, 2000] /

Fig. 3. Earthquakes in the Sea of Marmara region during the period 1500–1999 with magnitude M≥ 6.0. The main earthquakes in the Sea of Marmara region are from Table 1. Large black circles are events with M ≥ 7.0, small black circles are those with 7.0 > M ≥ 6.6, and white circles are those with 6.6 > M ≥ 6.0. Only those with M ≥ 7.0 are labeled with dates [Ambraseys, Jackson, 2000]

Северо-Анатолийский разлом представляет собой правосторонний сбросо-сдвиговый разлом протяжённостью около 1200 км. Он тянется от Саросского залива в Эгейском море на западе до Карлиовского тройного разлома при сочленении с Восточно-Анатолийским разломом на востоке. Формирование разлома началось примерно 13–11 миллионов лет назад на востоке Анатолии и со временем распространилось на запад. Разлом в районе Мраморного моря окончательно сформировался около 200 000 лет назад, хотя движение сдвигового характера в этой полосе началось ещё в позднем миоцене.

На восточной части Северо-Анатолийского разлома до Измита зона разлома представляет собой четко определенную морфологическую структуру, которая повторяет границу Анатолийской и Евразийской плит. Зона достаточно узкая, локализованная и фактически разделяет относительно жесткие регионы Черного моря и Центральной Анатолии.

Правосторонний сдвиг со смещением продолжается к западу от Измита, но становится распространенным по нескольким субпараллельным полосам в Мраморном море, северо-западной Турции и северной части Эгейского моря [Barka, Kadinsky-Kade, 1988; Taymaz et al., 1991]. Сейсмические исследования в Мраморном море выявляют множество разломов с большими нормальными компонентами [Okay et al., 1999], а землетрясения с механизмами нормальных сбросов наблюдаются вокруг его границ. Мраморное море предположительно было образовано растяжением земной коры по механизму пул-апарт (pull-apart). Исследования GPS показывают, что сдвиг с востока на запад по всей области рисунка 3 составляет около 23 ± 3 мм в год [Straub et al., 1997; McClusky et al., 2000].

Методика исследования

Построение геодинамической и геотермической модели Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона

Причиной продвижения землетрясений вдоль Восточно-Анатолийского разлома может служить глубинный мантийный поток, поднимающийся от границ ядра под Большой Африканский рифт (рис. 4).

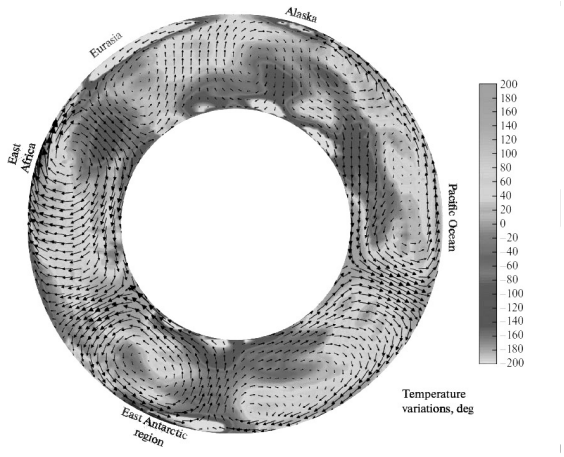

Рис. 4. Распределение аномалий температуры и скорости в мантии Земли в поперечном сечении по 40 ^{0} и 220 ^{0} в.д. [Baranov et al., 2023] /

Fig. 4. Distribution of temperature and velocity anomalies in the Earth's mantle in the cross section along 40 ^{0} and 220 ^{0} E [Baranov et al., 2023]

Глубинные мантийные потоки распространяются на север к Кавказскому региону, где разделяются на три ветви – на запад к Анатолийской плите, на восток к Аравийской плите и на север к Евразийской плите и структуре Кавказа (рис. 5).

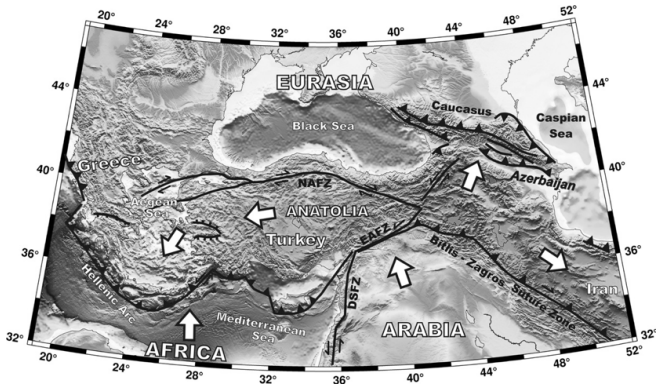

Рис. 5. Геодинамика Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона (USGS) /

Fig. 5. Geodynamics of the Caucasus-Anatolian-Arabian region (USGS)

Важным моментом является переход событий в регион Мраморного моря, что меняет реологическую обстановку вследствие уменьшения толщины коры и динамики формирования и эволюции осадочного бассейна. Замеченные особенности сейсмичности в Мраморном море способствуют решению некоторых задач прогноза и предупреждения землетрясений. Так, было замечено, что длина активных элементов Северо-Анатолийского разлома в море короче, чем на суше в восточной части разлома. Землетрясения в море слабее, чем на континенте. А также существуют сейсмические окна (бреши), где землетрясения не происходят много лет. Так, часть Северо-Анатолийского разлома, примыкающая к Стамбулу, не активизировалась с 1766 года. Важным моментом анализа является то, что цепочка землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома, продвигаясь на запад, перескочила город Стамбул, что хорошо укладывается в концепцию продвижения, когда предыдущим сильным землетрясением было землетрясение 1999 года на востоке Мраморного

моря. Землетрясение 2025 года имеет более низкую магнитуду 6,2 по сравнению с магнитудой 7,4–7,6 в 1999 году, что отражает переход на более тонкую кору моря с другой реологией (рис. 6).

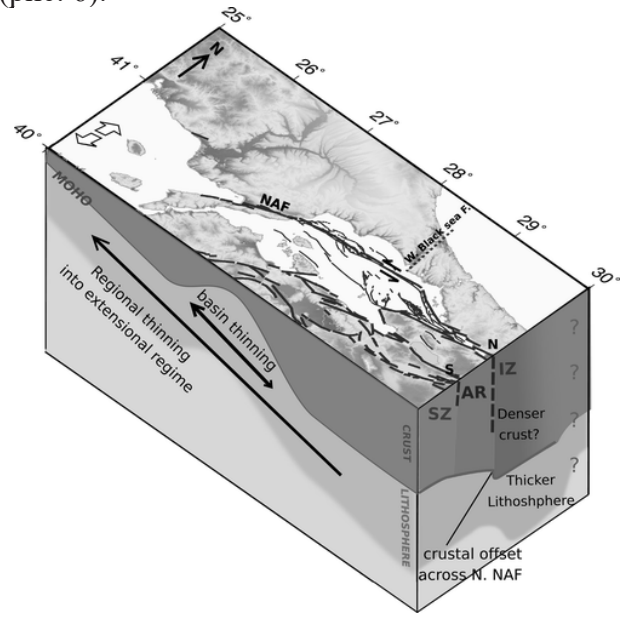

Рис. 6. Утоньшение коры в Мраморном море [Garzon et al., 2020] /
Fig. 6. Crust thinning in the Marmara Sea [Garzon et al., 2020]

Если считать, что сильные землетрясения, распространяющиеся вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, преодолели окрестность Стамбула и продвигаются дальше на запад к Эгейскому морю, свидетельством чего может служить землетрясение 2025 года западнее Стамбула, то это может говорить о снижении сейсмического риска для Стамбула в ближайшее время в плане горизонтальных движений по разлому.

Исторические землетрясения 1509 и 1766 гг. в окрестности Стамбула не связаны с последовательным движением землетрясений по разлому на запад, но отражают другие важные закономерности. Так, следует обратить внимание на то, что сейсмичность во многих осадочных бассейнах Альпийско-Гималайского и Тихоокеанского поясов концентрируется на периферии бассейнов, а наиболее глубоководная часть депрессий характеризуется пониженной сейсмичностью, а также повышенным тепловым потоком [Свалова, Заалишвили, 2024а, б; McKenzie, 1978]. Эти закономерности хорошо объясняются подъемом мантийных диапиров при формировании осадочных бассейнов.

На начальной стадии формирования бассейна на земной поверхности образуется структура сводового поднятия, а затем глубокая депрессия, что отражает геодинамику подъема и остывания диапира и растекания вещества над ним вследствие гравитационной неустойчивости [Свалова, Заалишвили, 2024а]. Аналогичный механизм проявляется в Мраморном море. Подъем мантийных масс утоньшает кору и повышает тепловой поток под впадиной. Причем важно отметить, что вся впадина Мраморного моря состоит из отдельных депрессий, что может отражать как проявление гравитационной неустойчивости в виде подъема отдельных диапиров, так и формирование впадины по механизму пул-апарт (pull-apart) растяжения разломов, когда подъем мантийного вещества в центре формирующихся впадин играет пассивную роль, заполняя освободившееся пространство (рис. 7).

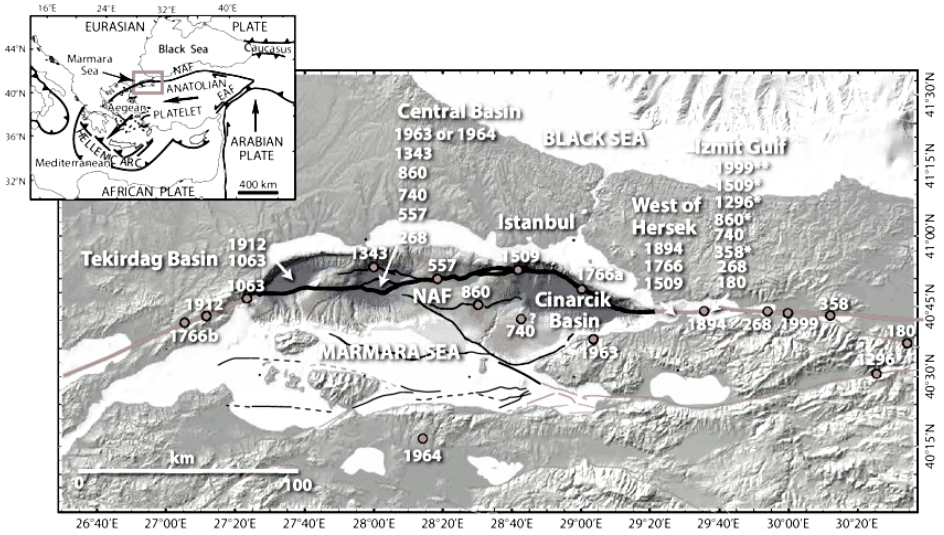

Рис. 7. Исторические землетрясения и бассейны Мраморного моря [Mchugh et al., 2014] /
Fig. 7. Historical earthquakes and basins of Marmara Sea [Mchugh et al., 2014]

Тепловой поток в центре впадин является повышенным, а границы впадин находятся в более хрупком состоянии, подверженном землетрясениям. Более горячая среда в центре депрессий способствует снижению вязкости и меньше способствует накоплению энергии упругого напряжения для последующего землетрясения, когда достигается предел прочности пород и происходит разрядка напряжений (рис. 8).

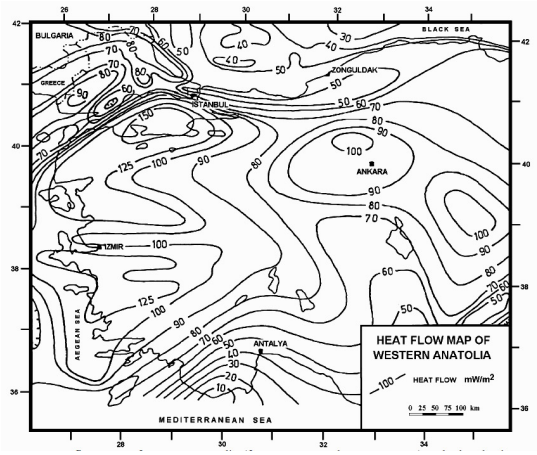

Рис. 8. Карта теплового потока западной Анатолии [Gokturkler et al., 2003] /
Fig. 8. Heat flow map of western Anatolia [Gokturkler et al., 2003]

Обсуждение и результаты

Можно рассматривать два механизма достижения предела прочности пород на глубине для формирования очага землетрясения, связанных с геодинамикой движения вещества в литосфере. Это активизация сейсмогенерирующих разломов вследствие горизонтального движения литосферных плит и вертикальный подъем вещества в виде мантийных диапиров вследствие гравитационной неустойчивости. Это механизмы сочетания плит-тектоники и плюм-тектоники. Оба эти механизма реализуются в Мраморном море в окрестности Стамбула в виде активизации Северо-

Анатолийского разлома при продвижении очагов землетрясений с востока на запад и в виде геотермической контрастности в литосфере на границе поднимающегося мантийного диапира у морского побережья в районе Босфора, что также может сопровождаться формированием разломов вдоль границ бассейна.

Зная общие закономерности механического поведения вещества литосферы в различных геодинамических обстановках и в процессе подготовки землетрясений, следует детально анализировать геолого-геофизические данные и строить геодинамические и геотермические модели сейсмичных и асейсмичных зон и регионов с целью прогноза и предупреждения опасных природных процессов (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

Геолого-геофизические данные для Альпийского и Тихоокеанского поясов / Geological-geophysical data for Alpine and Pacific belts

Структуры / Structures	**Толщина осадочного чехла (км) / Thickness of sedimentary cover (km)**	**Толщина кристаллической коры (км) в центре (числитель) в окружении (знаменатель) / Thickness of crystalline crust (km) in the center (numerator) surrounded (denominator)**	**Тепловой поток (мВт / м^2) Heat flow (mW/m ^{2})**	**Сейсмичность + высокая - низкая / Seismicity + high - low In the center (numerator) surrounded (denominator)**
1. Тирренское море/ Tyrrhenian Sea	6	16/45	30–160	- /+
2. Эгейское море/ Aegean Sea	3	15/23	100	- /+
3. Черное море/ Black Sea	16	15/45	30–35	- /+
4. Прикаспийская впадина/ Pre-Caspian Depression	24	12/40	40	-/-
5. Южно-Каспийская впадина/South-Caspian Depression	20	12/45	40–50	- /+
6. Ионическое море (юг)/ Ionian Sea (South)	12	10/35	30–40	- /+
7. Ионическое море (север)/ Ionian Sea (North)	8	10/30	50–70	- /+
8. Балеарское море/ Balearic Sea	8	10/40	50	- /+
9. Левантийская впадина/ Levantine Basin	6	8/30	30	- /+

10. Паннонская впадина/ Pannonian Basin	9	18/27	90	-/-
11. Алеутская впадина/ Aleutian Basin	5	10/26	60–80	- /+
12. Охотское море/ Sea of Okhotsk	4	8/20	100	- /+
13. Японское море/ Sea of Japan	2	12/29	100–120	- /+
14. Филиппинское море/ Philippine Sea	2	6/13	60	- /+
15. Мраморное море/ Sea of Marmara	3	15/35	150	- /+
16. Турция/ Turkey	0–2	40/40	70–120	+/+
17. Кавказ/ Caucasus	0–2	60/40	70	+/+

Детальный анализ геолого-геофизических данных дает возможность выявить основные закономерности взаимосвязи геотермии, сейсмичности, толщин слоев литосферы, а также возраста геологических структур. Сочетание тонкой коры и высокого теплового потока сопровождается пониженной сейсмичностью, что характерно для осадочных бассейнов и морских впадин. Высокий тепловой поток в сочетании с толстой корой сопровождается высокой сейсмичностью. Это случай Кавказа и Турции. Толстая кора способствует упрочнению коры, а высокий тепловой поток снижает прочность коры. Оба механизма действуют в противоположных направлениях, но результат для сейсмичности зависит от соотношения геолого-геофизических параметров. Кора должна быть достаточно толстой, а высокий тепловой поток отражает высокую геодинамическую активность региона по типу коллизии литосферных плит для Кавказа или подъема глубинных мантийных потоков, что характерно для Турции. Хорошо известна зависимость тепловой поток – возраст тектоно-магматической активизации. Связь плотности «поверхностного» теплового потока с возрастом тектоно-магматической активности в континентальной коре детально исследована [Поляк, Смирнов, 1966; Хуторской, 2023]. Чем выше тепловой поток, тем моложе кора. Также тонкая кора ассоциируется с высоким тепловым потоком, как видно на границе Тейссера-Торнквиста, разделяющей тонкую (молодую) и толстую (древнюю) кору в Европе. Зона Тейссера-Торнквиста (также называемая Trans-European Suture Zone, или Транс-Европейская шовная зона TESZ) – демаркационная линия между Восточно-Европейским кратоном, относящимся к докембрию, и фанерозойскими орогенами юго-западной Европы. Зона простирается от Северного до Черного морей. Сейсмические и гравитационные данные подтверждают сильный контраст в толщине земной коры от 28–35 км к западу от шовной зоны до 42–47 км к востоку.

Этим же объясняется пониженный тепловой поток Черного моря, когда на большой глубине фиксируются пониженные температуры к востоку от линии Тейссера-Торнквиста (рис. 9).

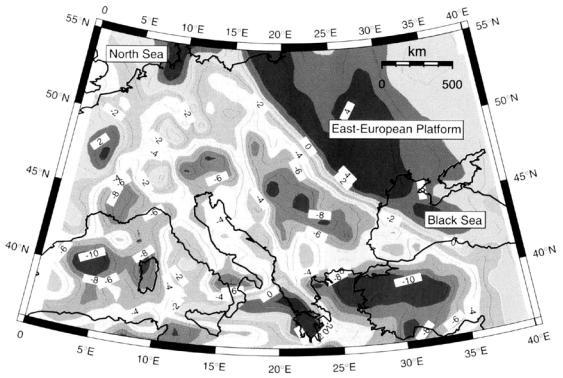

Рис. 9. Вариации скоростей сдвиговых волн (в %) под Европой на глубине 80 км. Пониженные скорости характеризуют молодую фанерозойскую Западную Европу. Высокие скорости соответствуют древней Восточно-Европейской платформе [EUROPROBE ..., 1996] /

Fig. 9. Shear wave velocity variations (in%) underneath Europe at a depth of 80 km. The lower velocities characterize the young Phanerozoic Western Europe. The higher velocities correspond to the ancient East European platform [EUROPROBE ..., 1996]

Выводы

Возможны два механизма достижения предела прочности пород на глубине для формирования очага землетрясения. Это активизация сейсмогенерирующих разломов вследствие горизонтального движения литосферных плит и вертикальный подъем вещества в виде мантийных диапиров вследствие гравитационной неустойчивости. Это механизмы сочетания плит-тектоники и плюм-тектоники. Оба эти механизма реализуются в Мраморном море в окрестности Стамбула в виде активизации Северо-Анатолийского разлома при продвижении очагов землетрясений с востока на запад и в виде геотермической контрастности в литосфере на границе поднимающегося мантийного диапира у морского побережья в районе Босфора.

Причиной продвижения землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома может служить глубинный мантийный поток, поднимающийся от границ ядра под Большой Африканский рифт, известный на земной поверхности как Афарский плюм. Глубинные мантийные потоки распространяются на север к Кавказскому региону, где разделяются на три ветви – на запад к Анатолийской плите, на восток к Аравийской плите и на север к Евразийской плите и структуре Кавказа.

Можно считать, что сильные землетрясения, распространяюшиеся вдоль Северо-Анатолийского разлома с востока на запад, преодолели окрестности Стамбула и продвигаются дальше на запад к Эгейскому морю, свидетельством чего служит землетрясение 2025 года западнее Стамбула, что говорит о снижении сейсмического риска для Стамбула в ближайшее время в плане горизонтальных движений по разлому.

Опасность сильного землетрясения по типу продвижения вдоль Северо-Анатолийского разлома для Стамбула снижается вследствие землетрясения в Мраморном море 2025 года. В то же время опасность от возможного землетрясения по типу исторических землетрясений геотермического механизма вследствие гравитационной неустойчивости и формирования очага землетрясения у границ депрессии остается высокой. Такое землетрясение с периодом 250 лет (1509 г., 1766 г.) в окрестности Стамбула может произойти в течение ближайших нескольких лет.

Литература

1. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я. Сейсмологические индикаторы геодинамических обстановок формирования землетрясений на территории Турции в 2023 году. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 19–32. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002.

2. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Мкртчян М.А., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Карапетян Р.К., Мкртчян Г.А. Разрядка сейсмотектонических напряжений Восточно-Турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г. Mw = 7.8 как процесс деструкции геологической среды очаговой области. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 3. – С. 71–84. DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f.

3. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения (Mw=7,8). // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004.

4. Поляк Б.Г., Смирнов Я.Б. Тепловой поток на континентах. // Доклады академии наук СССР. – 1966. – Т. 168(1). – С. 170–172.

5. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Геодинамика и геоэкология. – М.:, Владикавказ: ГФИ ВНЦ РАН, 2024а. – 346 с.

6. Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2024б. – Т. 14. № 2. – С. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006.

7. Хуторской М.Д. Региональное тепловое поле и геотермальные ресурсы Кавказского региона. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 73–88. DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006.

8. Ambraseys N.N., Jackson J.A. Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500. Geophysical Journal International. 2000. Vol. 141. Issue 3. pp. F1–F6. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00137.x.

9. Baranov A.A., Lobkovskii L.I., Bobrov A.M. Global geodynamic model of the modern Earth and Its application to the Antarctic Region. Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 512. Part 1. pp. 854–858. DOI: 10.1134/S1028334X23601086.

10. Barka A., Kadinsky-Cade K. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. Tectonics. 1988. Vol. 7. pp. 663–684.

11. Bohnhoff M., Bulut F., Dresen G., Malin P.E., Eken T., Aktar M. An earthquake gap south of Istanbul. Nature Communications. 2013. Vol. 4. Art. No. 1999. DOI: 10.1038/ncomms2999.

12. EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Eds. D.G. Gee, H.J. Zeyen. Uppsala University. 1996. 138 p.

13. Garzon P., Bohnhoff M., Nurlu M. Crustal thickness variation across the Sea of Marmara region, NW Turkey: A reflection of modern and ancient tectonic processes. Tectonics. 2020. Vol. 39. Art. No. e2019TC005986.

14. Gokturkler G., Salk M., Sari C. Numerical modeling of the conductive heat transfer in western Anatolia. Journal of the Balkan Geophysical Society. 2003. Vol. 6. No. 1. pp. 1–15.

15. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105. No. B3. pp. 5695–5719.

16. Mchugh C.M.G., Seeber L., Cormier M.-H., Hornbach M. Submarine paleoseismology along populated transform boundaries: The Enriquillo-Plantain-Garden Fault, Canal du Sud, Haiti, and the North Anatolian Fault, Marmara Sea, Turkey. Oceanography. 2014. Vol. 27. Issue 2. pp. 118–131. DOI: 10.5670/oceanog.2014.47.

17. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. Geophys. J. R. astr. Soc. 1978. Vol. 55. pp. 217–254.

18. Okay A.I., Demirbag E., Kurt H., Okay N., Kuscu I. An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian Fault, Turkey. Tectonics. 1999. Vol. 18. pp. 129–147.

19. Straub C., Kahle H.-G., Schindler C. GPS and geologic estimates of the tectonic activity in the Marmara Sea region, NW Anatolia. Journal of Geophysical Research. 1997. Vol. 102. Issue 27. pp. 587–610.

20. Svalova V. Geodynamics of the Caucasus – Anatolian-Arabian region and Turkey-Syria Earthquakes 2023. Journal of Basic & Applied Sciences. 2023. Vol. 19. pp. 40–59.

21. Taymaz T., Jackson J., McKenzie D. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. Geophysical Journal International. 1991. Vol. 106. pp. 433–490.

References

1. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Seismological indicators of geodynamic conditions of earth-quakes formation in Turkey in 2023. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13 No. 3. pp. 19–32. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002. (In Russ.)

2. Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Mkrtchyan M.A., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Karapetyan R.K., Mkrtchyan G.A. Release of seismotectonic stresses of the Eastern Turkey earthquake on 06 February 2023 Mw = 7.8 as a destruction process in focal area. Geology and Geophysics of Russian South. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 71–84. DOI: DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f. (In Russ.)

3. Geodakyan E.G., Karapetyan Jh.K., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Mkrtchyan M.A., Mkrtchyan G.A. Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake (Mw =7.8). Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004. (In Russ.)

4. Polyak B.G., Smirnov Ya.B. Heat flow on continents. Doklady Earth Sciences USSR. 1966. Vol. 168(1). pp. 170–172. (In Russ.)

5. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Geodynamics and Geoecology. Moscow. Vladikavkaz. GPI VSC RAS. 2024a. 346 p. (In Russ.)

6. Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolian region. Geology and Geophysics of Russian South. 2024b. Vol. 14. No. 2. pp. 77–89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006. (In Russ.)

7. Khutorskoy M.D. Regional thermal field and geothermal resources of the Caucasus region. Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 73–88. DOI: 10.46698/VNC.2023.51.69.006. (In Russ.)

8. Ambraseys N.N., Jackson J.A. Seismicity of the Sea of Marmara (Turkey) since 1500. Geophysical Journal International. 2000. Vol. 141. Issue 3. pp. F1–F6. DOI: 10.1046/j.1365-246x.2000.00137.x.

9. Baranov A.A., Lobkovskii L.I., Bobrov A.M. Global geodynamic model of the modern Earth and Its application to the Antarctic Region. Doklady Earth Sciences. 2023. Vol. 512. Part 1. pp. 854–858. DOI: 10.1134/S1028334X23601086.

10. Barka A., Kadinsky-Cade K. Strike-slip fault geometry in Turkey and its influence on earthquake activity. Tectonics. 1988. Vol. 7. pp. 663–684.

11. Bohnhoff M., Bulut F., Dresen G., Malin P.E., Eken T., Aktar M. An earthquake gap south of Istanbul. Nature Communications. 2013. Vol. 4. Art. No. 1999. DOI: 10.1038/ncomms2999.

12. EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Eds. D.G. Gee, H.J. Zeyen. Uppsala University. 1996. 138 p.

13. Garzon P., Bohnhoff M., Nurlu M. Crustal thickness variation across the Sea of Marmara region, NW Turkey: A reflection of modern and ancient tectonic processes. Tectonics. 2020. Vol. 39. Art. No. e2019TC005986.

14. Gokturkler G., Salk M., Sari C. Numerical modeling of the conductive heat transfer in western Anatolia. Journal of the Balkan Geophysical Society. 2003. Vol. 6. No. 1. pp. 1–15.

15. McClusky S., Balassanian S., Barka A., Demir C., Ergintav S., Georgiev I., Gurkan O., Hamburger M. et al. Global positioning system constraints on plate kinematics and dynamics in the eastern Mediterranean and Caucasus. Journal of Geophysical Research. 2000. Vol. 105. No. B3. pp. 5695–5719.

16. Mchugh C.M.G., Seeber L., Cormier M.-H., Hornbach M. Submarine paleoseismology along populated transform boundaries: The Enriquillo-Plantain-Garden Fault, Canal du Sud, Haiti, and the North Anatolian Fault, Marmara Sea, Turkey. Oceanography. 2014. Vol. 27. Issue 2. pp. 118–131. DOI: 10.5670/oceanog.2014.47.

17. McKenzie D. Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt: the Aegean Sea and surrounding regions. Geophys. J. R. astr. Soc. 1978. Vol. 55. pp. 217–254.

18. Okay A.I., Demirbag E., Kurt H., Okay N., Kuscu I. An active, deep marine strike-slip basin along the North Anatolian Fault, Turkey. Tectonics. 1999. Vol. 18. pp. 129–147.

19. Straub C., Kahle H.-G., Schindler C. GPS and geologic estimates of the tectonic activity in the Marmara Sea region, NW Anatolia. Journal of Geophysical Research. 1997. Vol. 102. Issue 27. pp. 587–610.

20. Svalova V. Geodynamics of the Caucasus – Anatolian-Arabian region and Turkey-Syria Earthquakes 2023. Journal of Basic & Applied Sciences. 2023. Vol. 19. pp. 40–59.

21. Taymaz T., Jackson J., McKenzie D. Active tectonics of the north and central Aegean Sea. Geophysical Journal International. 1991. Vol. 106. pp. 433–490.