

УДК 550.34

DOI: 10.46698/w5501-6423-2815-n

Оригинальная статья

О сейсмической активизации центральной части Эгейской вулканической дуги

Э.Г. Геодакян¹, Дж.К. Карапетян¹, Л. Ли², В.Б. Заалишвили³,
Б.В. Саакян¹, Г.А. Мкртчян¹, Р.К. Карапетян¹, М.А. Мкртчян¹

¹ Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. А. Назарова НАН РА,
Республика Армения, 3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна, 5а,
e-mail: geodakyan.e@mail.ru;

² Институт геофизики, Китайское управление по землетрясениям,
Китай, 100081, г. Пекин;

³ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а

Статья поступила: 10.09.2025, доработана: 04.12.2025, принята к публикации: 08.12.2025

Резюме: Актуальность работы. Центральная часть Эгейской вулканической дуги имеет сложное геолого-тектоническое строение. Здесь выделяется протяжённый вулcano-тектонический линеамент Санторин-Амаргос, где расположены крупные активные подводные вулканические сооружения Санторин-Колумбо, и, к которым приурочены очаги сильнейших в Средиземноморском бассейне дуплет-землетрясений 1956 г. с магнитудами $M=7.4$ и $M=7.1$. Возникновение в этой области аномального проявления сейсмической активизации отражает сложные взаимосвязанные вулcano-тектонические процессы, изучение которых является актуальной и крайне важной научной задачей. **Целью** работы является на основе комплексного анализа сейсмических данных установление возможной связи этих процессов с геодинамической активизацией субдукционной зоны взаимодействия Африканской макроплиты с Эллинской мезоплитой или с сейсмическим отображением глубинных процессов магматической деятельности подводных вулканических сооружений Санторин-Колумбо. **Методы.** Для осуществления поставленной цели использовались современные методические подходы и алгоритмы кластерного анализа сейсмических событий, решены их фокальные механизмы, изучены особенности волновых картин, а также количественные метрики частотных характеристик, длительность и полный момент тензора (МТ) очагового излучения. **Результаты** комплексного анализа позволяют прийти к выводу, что весь аномальный процесс имеет вулканическую природу возникновения и отображает глубинные процессы магматической деятельности по всей протяжённости подводного вулcano-тектонического линеамента Санторин-Амаргос. Динамика развития аномального процесса во времени указывает, что этот процесс включает одновременное возникновение кратковременного биения магматической камеры подводного дремлющего вулкана Колумбо и тремора всего протяжённого подводного вулcano-тектонического линеамента. По всей вероятности, выявленная активизация связана с дополнительной инъекцией магматического вещества флюидами из верхней мантии в магматический резервуар в область вулканического сооружения Колумбо и его диффузией по всей протяжённости подводного вулcano-тектонического линеамента. Выдвигается гипотеза, что причиной дополнительной инъекции лёгких флюидов из верхней мантии в магматический резервуар, питающий тектонический линеамент Санторин-Амаргос, являются предельные упругие напряжения в очаговой области формирующегося крупного тектонического землетрясения.

Ключевые слова: сейсмичность, сейсмический момент, рой землетрясений, грабен, вулкан, вулcano-тектонической линеамент, кальдера, магматическая камера.

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета высшего образования и науки Республики Армения в рамках исследовательского проекта (№ АСН-01/23, 21SCG-1E021).

Для цитирования: Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Ли Л., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Мкртчян Г.А., Карапетян Р.К., Мкртчян М.А. О сейсмической активизации центральной части Эгейской вулканической дуги. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 42–59. DOI: 10.46698/w5501-6423-2815-n

DOI: 10.46698/w5501-6423-2815-n

Original paper

On seismic activation of the central part of the Aegean volcanic arc

E.G. Geodakyan¹, J.K. Karapetyan¹, L. Li², V.B. Zaalishvili³,
B.V. Sahakyan¹, G.A. Mkrtchyan¹, R.K. Karapetyan¹, M.A. Mkrtchyan¹

¹ Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of NAS RA,
5a V. Sargsyan Str., Gyumri 3115, Republic of Armenia,
e-mail: geodakyan.e@mail.ru;

² Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China;

³ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 10.09.2025, revised: 04.12.2025, accepted: 08.12.2025

Abstract: Relevance. The central part of the Aegean volcanic arc has a complex geological and tectonic structure. The extended Santorini-Amargos volcanic-tectonic lineament is prominent, home to the large, active, submarine volcanic edifices of Santorini-Columbo. This area was the source of the 1956 doublet earthquakes with magnitudes $M=7.4$ and $M=7.1$ that are the strongest in the Mediterranean Basin. The occurrence of anomalous seismic activity in this area reflects the complex interplay of volcanic-tectonic processes. The study of these processes is a pressing and extremely important scientific task. **The aim** of this work is to determine, using a comprehensive analysis of seismic data, whether this process is associated with geodynamic activation of the subduction zone of interaction between the African macroplate and the Hellenic mesoplate, or whether it represents a seismic reflection of deep magmatic activity in the Santorini-Columbo underwater volcanic structures. **Methods.** To achieve this aim, modern methodological approaches and algorithms for cluster analysis of seismic events were applied. Focal mechanisms of the events resolved, and wave pattern features were studied, as well as quantitative metrics of frequency characteristics, duration, and total moment of the tensor (MT) of focal radiation. **The results** of the comprehensive analysis lead to the conclusion that the entire anomalous process is volcanic in origin and reflects deep magmatic activity along the entire length of the Santorini-Amargosa submarine volcanic-tectonic lineament. The temporal dynamics of the anomalous process indicates that it reflects the simultaneous occurrence of a short-term pulsation of the magma chamber of the dormant Columbo submarine volcano and tremors of the entire extended submarine volcanic-tectonic lineament. Most likely, the detected activation is associated with an additional injection of magmatic material, in the form of fluids, from the upper mantle into the magma reservoir in the Columbo volcanic edifice area and its diffusion along the entire length of the submarine volcanic-tectonic lineament. A hypothesis is proposed that the additional injection of light fluids from the upper mantle into the magma reservoir feeding the Santorini-Amargosa tectonic lineament is caused by extreme elastic stresses in the focal region of a developing large tectonic earthquake.

Keywords: seismicity, seismic moment, earthquake swarm, graben, volcano, volcano-tectonic lineament, caldera, magma chamber.

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Committee of Higher Education and Science of the Republic of Armenia as part of a research project (No. ACH-01/23, 21SCG-1E021).

For citation: Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Li L., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Mkrtchyan G.A., Karapetyan R.K., Mkrtchyan M.A. On seismic activation of the central part of the Aegean volcanic arc. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2025. 15(4): 42–59. DOI 10.46698/w5501-6423-2815-n

Введение

В центральной части Эгейской вулканической дуги, ограниченной географическими координатами $\varphi=35,5^{\circ}\div 37,5^{\circ}$ N, $\lambda=24,5^{\circ}\div 26,5^{\circ}$ E, по данным EMSC от 25 января 2025 г. отмечено начало процесса сейсмической активизации в виде возникновения большого числа умеренных и слабых по силе землетрясений, продолжавшихся до 06.03.2025 г. По данным близко расположенных сетей сейсмических наблюдений Греции (National Observatory of Athens, Geodynamic Institute (NOA)) и сейсмологической обсерватории Турции (Kandilli Observatory and Earthquake Research Institute (KOERI)), контролирующих сейсмичность региона, зарегистрировано более 3100 сейсмических событий в магнитудном диапазоне $M=2\div 5,3$. Наиболее сильные 14 землетрясений магнитудой $M\geq 5$, зарегистрированы также китайско-армянской автоматизированной системой сейсмических наблюдений на территории Армении [Karapetyan et al., 2022].

В этом районе расположены крупные подводные вулканические сооружения Санторин-Амаргос и фрагмент Восточно-Средиземноморского трансрегионального, протяженного, глубоководного Эллинского желоба, представляющий собой зону субдукции Африканской, Аравийской и Европейской литосферных макроплит. Непосредственно к области активного подводного вулканического сооружения Санторин приурочены очаги сильнейших в Эгейском море дуплет-землетрясений 1956 г. с магнитудами $M=7.4$ и $M=7.1$ [Ambraseys, Adams, 1998].

Изучение возникшего аномального процесса является актуальной и крайне важной научной задачей, позволяющей выявить природу его возникновения. Целью работы было на основе анализа сейсмических данных установление связи этого процесса с геодинамической активизацией субдукционной зоны взаимодействия Африканской макроплиты с Эгейской мезоплитой или с сейсмическим отображением глубинных процессов магматической деятельности подводных вулканических сооружений Санторин-Колумбо.

Методы исследования

При выполнении комплексного анализа в работе были использованы современные методические подходы и алгоритмы кластерного анализа сейсмических событий, решение их фокальных механизмов, изучены особенности волновых картин, а также количественные метрики частотных характеристик, длительность и полный момент тензора (MT) очагового излучения.

В качестве исходных данных были привлечены приведённые в информационных бюллетенях сейсмологических агентств EMSC, NOA, KOERI высокоточные определения параметров гипоцентров сейсмических событий с магнитудами $M\geq 2.0$ (<http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/tr/>; <https://www.emsc.eu/>; <https://bbnet.gein.noa.gr/HL/>). Для анализа пространственного распределения эпицентров сейсмических событий была применена программа MapInfo в пакете GIS, с помощью которой была построена карта эпицентров сейсмических событий за вышеуказанный период.

Зарегистрированные в цифровом формате 14 землетрясений с магнитудами $M\geq 5.0$ на 5 стационарных автономных сейсмических станциях автоматизированной системы сейсмических наблюдений Армении являются исходным фактическим материалом для анализа волновых форм и спектров мощности землетрясений с целью отнесения приуроченности событий к одному из источников.

Обзор региональной геотектоники, вулканизм и сейсмичность исследуемой территории

Крупный регион, охватывающий южную Европейскую часть Евразийской платформы и Средиземноморье, имеет сложное плитотектоническое строение, которое характеризуется взаимодействием крупных (Африканской, Аравийской и Евразийской) литосферных макроплит. На современном этапе эволюция этих литосферных макроплит сводится к движению Африканской и Аравийской макроплит на север к Евразийской плите (рис. 1), смещающему Анатолийскую мезоплиту на запад и способствующему опусканию Эгейской плиты по направлению на юго-запад (рис. 1) [Хаин, 1984; Апродов, 2000; Reilinger et al., 2006, 2010; Свалова, 2025].

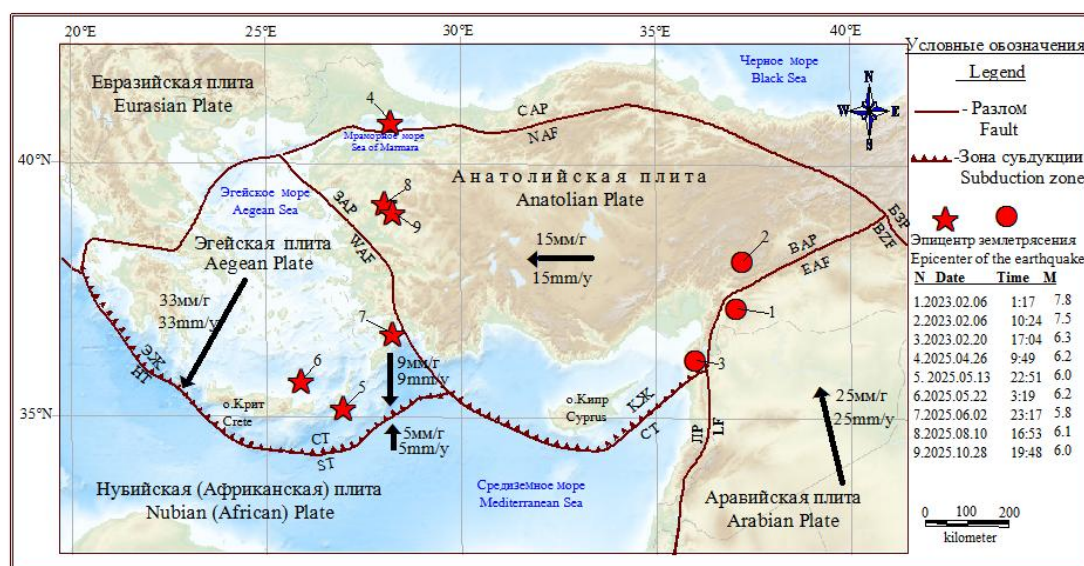


Рис. 1. Структура крупных литосферных плит юга Европы и Средиземноморья и кинематика их взаимодействия [Хаин, 1984]:

ВАР – Восточно-Анатолийский разлом, САР – Северо-Анатолийский разлом, ЗАР – Западно-Анатолийский разлом, ЛР – Левантский разлом, БЗР – Битлис-Загросский разлом, ЭЖ – Эллинский желоб, СТ – Страбон желоб, КЖ – Кипрский желоб /

Fig. 1. The structure of the system of large lithospheric plates of South Europe and the Mediterranean and the kinematics of their interaction [Khain, 1984]:

EAF – East Anatolian Fault, NAF – North Anatolian Fault, WAF – West Anatolian Fault, LF – Levant Fault, BZF – Bitlis-Zagros Fault, EH – Hellenic Trench, PST – Strabo Trench, CT – Cyprus Trench

Возникновение сильнейших за последнее 100-летие катастрофических Восточно-Турецких землетрясений от 06.02.2023 г. и 20.02.2023 г. с магнитудами $M=7.8$, $M=7.5$, $M=6.3$ соответственно [Геодакян и др., 2023, 2024; Karapetyan et al., 2024] обусловило изменение кинематики и перераспределение тектонических напряжений взаимодействия в этой сложной системе.

До 2025 г. сильнейшие землетрясения $M \geq 6.0$ в этой системе не наблюдались. В 2025 г. произошли 6 землетрясений $M \geq 6.0$, расположение эпицентров которых в виде звёздочек (рис. 1), указывает на то обстоятельство, что в настоящее время наиболее активные процессы тектонического взаимодействия происходят в контактной зоне Анатолийской и Эгейской плит и Восточной части Эллинской дуги в зоне субдукции Африканской и Эгейской плит [Bohnhoff et al., 2006; Karagianni, Papazachos, 2007]. Следует отметить, что в непосредственной близости от этой зоны субдукции

происходил изучаемый нами аномальный процесс активизации слабой сейсмичности.

К северу от Восточно-Греческого сегмента Эллинской дуги, под воздействием тектоники плит, в южной части Эгейского моря, где происходит субдукция Африканской плиты под Эгейскую плиту, образовалась т.н. Южно-Эгейская вулканическая дуга (ЭВД) в виде цепочек более 10, арочно расположенных спящих и исторически активных крупных вулканов. Указанная дуга длиной 450 км включает вулканы, которые простираются от полуострова Метана на материковой Греции через острова Милос, Санторин, Кос, Яли и Нисирос до полуострова Бодрум в Турции [Casten Snopce, 2006; Brustle, 2012]. ЭВД, в центральной части которой происходит изучаемый нами процесс активизации умеренных и слабых землетрясений, имеет сложное геолого-тектоническое строение (рис. 2).

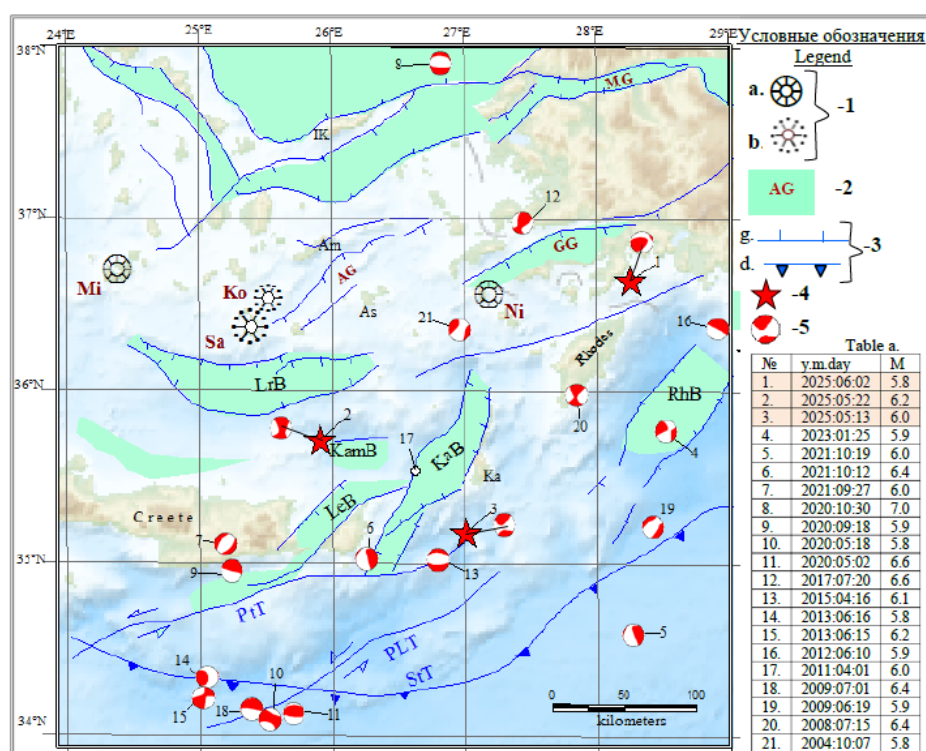


Рис. 2. Геотектоническое строение района центральной части Эгейской вулканической дуги [Chamot-Rooke et al., 2005]: 1 – вулканические центры: а – надводные вулканы, Милос (Mi), Нисирос (Ni); б – подводные вулканы, Санторин (Sa), Коломбо (Ko); 2 – основные грабены (G) и бассейны (B): Мендересский грабен (MG), Гёкова грабен (GG), Аморгосский грабен (AG), Ираклионский бассейн (IrB), Камилонисский бассейн (KamB), Иерапетрский бассейн (IeB), Карпатосский бассейн (KaB), Родосский бассейн (RhB); острова: Икарія (Ik), Наксос (Na), Аморгос (Am), Асиптапалеа (Ac), Карпатос (Ka); 3 – разломы и желоба: g – сдвиговые, d – надвиговые. Птолемейя желоб (PtT), Плиния (PlT), Страбона (StT); 4 – сильные землетрясения 2025 г.; 5 – стереограмма фокального механизма очага (данные в таблице а (усл. обозначения)) / Fig. 2. Geotectonic structure of the area of the central part Aegean volcanic arc [Chamot-Rooke et al., 2005]: 1 – Volcanic centers: a – above-water volcano, Milos (Mi), Nisyros (Ni); b – underwater volcano, Santorini (Sa), Kolombo (Ko); 2 – Major graben (G) and basins (B): Menderes graben (MG), Gokova graben (GG), Amorgos graben (AG), Iraklion basin (IrB), Kamilonisi basin (KamB), Ierapetra basin (IeB), Karpathos basin (KaB), Rhodes basin (RhB); Islands: Ikaria (Ik), Naxos (Na), Amorgos (Am), Asytpalea (Ac), Karpathos (Ka); 3 – Faults and trenches: g – strike-slips fault, d – thrusts fault. Ptolemy trench (PtT), Pliny (PlT), Strabo trenches (StT); 4 – Strong earthquakes in 2025; 5 – stereogram focal mechanism of the foci of earthquake (data in Table a (legend))

Подводный вулканический комплекс Санторин-Колумбо является наиболее крупной активной вулканической системой в Европе. Самое известное извержение вулкана Санторин датируется 1600 годом до н.э. (Минойское извержение) и считается одним из самых мощных извержений на нашей планете.

Результаты детального исследования кальдеры Санторин указывают, что на северном борту кальдеры выделяются более 91 сегмента даек и 15 разрывных нарушений способствующих или препятствующих распространению магмы [Drymoni et al., 2022]. Магматической резервуар вулкана Санторин расположен в земной коре на глубине от нескольких километров до десятков километров верхней мантии.

Активный вулкан Колумбо является крупнейшим из цепочки 19 вулканических конусов, протянувшихся от острова Санторин на северо-восток. Современный кратер Колумбо имеет приблизительно овальную форму диаметром 1,7 км. Диаметр вулкана составляет около 3,6 км, с глубиной залегания около 500 м. Сильнейшее извержение этого вулкана датируется 1650 г. н.э., которое по своей характеристике считается очень крупным и катастрофическим, с индексом VЕI=5–6. Объем магматической камеры составляет 1,4 км³, и находится в земной коре на глубине от 5 до 7 км [Nomikou et al., 2012; Klaver et al., 2016].

Вулкан Колумбо пространственно связан с вулканической системой Санторин. Однако недавние исследования геохимических характеристик коревых магматических систем этих вулканов указывают на различную историю дифференциации земной коры и их невзаимосвязанность [Klaver et al., 2016].

Для оценки текущей сейсмичности и сейсмического режима, на основе архивных сейсмостатистических инструментальных данных EMSC, нами был проведён анализ данных сейсмического мониторинга исследуемой территории за период 2005–2025 гг. Фоновая сейсмичность характеризуется умеренной интенсивностью проявлений слабых землетрясений. Среднее годовое количество землетрясений в магнитудном интервале от 2 до 3.5 варьируется в пределах 1000–1300. При этом по своей форме проявления, рассматриваемый нами кратковременный процесс интенсивной активизации слабой сейсмичности, за указанный период не наблюдался. Результаты нашего мониторинга указывают на повышенную интенсивность событий. За двадцать лет здесь произошли 19 сильных землетрясений с магнитудами $M \geq 5.8$, эпицентры и фокальные механизмы которых приведены на рисунке 2.

Анализ фокальных механизмов показывает, что в восточной части исследуемой территории, в очагах этих землетрясений преобладают, в основном, сбросо-сдвиговые подвижки. Это связано с тем обстоятельством, что, начиная от юго-запада Турции до зоны субдукции зон Беньюфа-Вадати-Заварицкого (БВЗ), действует поле растяжения тектонических напряжений, вероятно обусловленное миграцией Эгейской плиты на юг из-за отката Африканской литосферной плиты. В 5 очагах, расположенных южнее острова Крит, на кромке Африканской литосферной плиты, наблюдаются сеймотектонические подвижки взбросо-сдвигового типа.

Особого внимания заслуживают землетрясения, отмеченные звёздочками на рисунке 2, и произошедшие после окончания изучаемого нами процесса активизации в центральной части ЭВД, 13.05.2025 г., 22.05.2025 г., 02.06.2025 г. с магнитудами $M=6.0$, $M=6.2$, $M=5.8$ соответственно.

В ходе многолетних детальных инструментальных наблюдений в сейсмоактивных зонах сильных землетрясений были выявлены различные формы аномальных вариаций сейсмической активизации во времени, которые зависят от магнитуды го-

товящихся землетрясений. Наблюдались они на расстояниях от сотен до тысяч километров. Многочисленные теоретические исследования моделей подготовки тектонических и вулканических землетрясений, а также экспериментальные наблюдения аномальных проявлений сейсмичности различных сейсмоактивных регионов, показывают, что на процесс подготовки сильных землетрясений существенно влияют такие факторы, как изменение поля напряжений, упруго-пластические деформации, геометрия разломов и их насыщенность флюидом, реология и вязкость геологической среды в очаговой зоне. Это позволило разработать ряд методических подходов и алгоритмов, позволяющих выявлять аномальные проявления слабой сейсмичности, предвещающие возникновение сильных землетрясений [Hill et al., 1993; Родкин, Андреева, 2025б]. Исходя из вышеизложенного, нами был принят процесс подготовки этих 3 сильных землетрясений в качестве вероятного источника возникновения этой аномальной активизации.

Обсуждение результатов

Комплексный анализ инструментальных данных

Согласно оперативным данным EMSC в центральной части ЭВД, ограниченной географическими координатами $\varphi=35.5^{\circ}\div 37.5^{\circ}\text{N}$, $\lambda=24.5^{\circ}\div 26.5^{\circ}\text{E}$, с 25.01.2025 по 06.03.2025 гг. зафиксировано более 3095 сейсмических событий в магнитудном диапазоне $M=2\div 5.3$. В этом общем объёме количество умеренных землетрясений с магнитудами $M\geq 4$ составляет более 250.

Для детального анализа сейсмических событий весь массив исходных сейсмических данных нами был сгруппирован по магнитуде с шагом по фрактальности энергии $\Delta m=0.5$ и их распределение по глубине залегания очагов с интервалом $\Delta h=5$ км (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Распределение количества сейсмических событий по магнитуде и глубине /
Distribution of the number seismic events according to magnitude and to depth

Глубина (км) / Depth (km)	количество сейсмических событий (N) по магнитуде (M) / number of seismic events (N) by magnitude (M)							общее количество/ total number $\sum N(M)$
	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5+	
5	99	221	173	60	19	5	3	580
10	99	373	389	180	60	37	24	1162
15	26	238	440	278	121	59	1	1163
20	4	27	62	31	14	8	2	148
25	3	5	4	3	0	2	1	65
30	2	3	-	2	-	-	-	7
35	1	3	2	1	-	-	-	7
40+	-	1	4	5	3	-	-	13
$\sum N$	234	871	1074	560	217	110	30	3096

Для анализа пространственного распределения эпицентров сейсмических событий была применена программа MapInfo в пакете GIS, с помощью которой построена карта эпицентров сейсмических событий за вышеуказанный период (рис. 3).

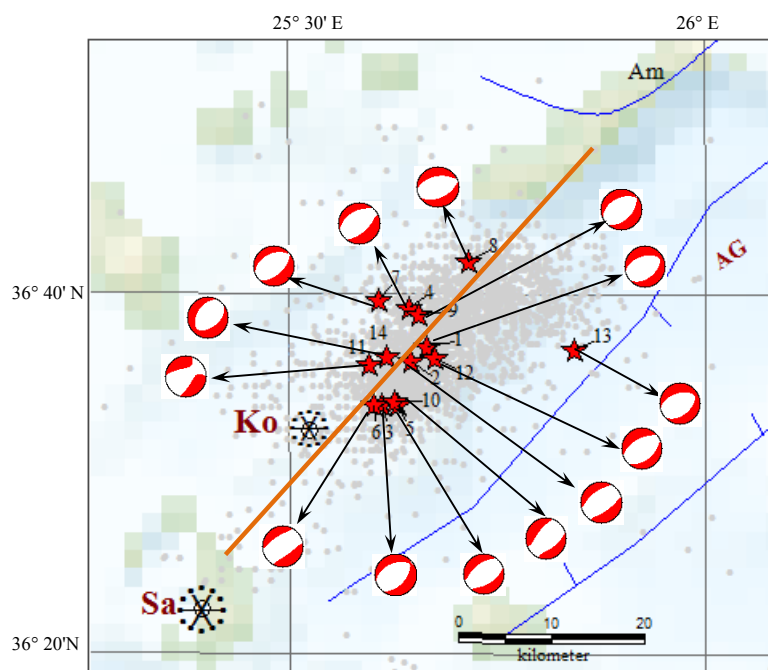


Рис. 3. Карта эпицентров сейсмических событий в области процесса аномальной активизации слабой сейсмичности и механизма очагов 14 землетрясений (см. таблицу 2).

A-A' – протяжённость эпицентрального поля /

Fig. 3. Map of epicenters of seismic events in the area of the process of anomalous activation of weak seismicity and the focal mechanism of the 14 earthquakes (see table 2),

A-A' – extent of epicentral field

В связи с большой насыщенностью эпицентрами сейсмических событий, эпицентрального поле на рисунке 3 представлено в виде области, оконтуренной краевыми эпицентрами, образующими периметр. На этом поле отдельно указаны эпицентры 14 сильных землетрясений с магнитудами $M \geq 5.0$, подробные инструментальные данные которых приведены в таблице 2.

Эпицентрального поле по латерали имеет вид протяжённой овалообразной полосы длиной $L=56$ км, шириной $W=26$ км и общей площадью $S \sim 1300$ км². Юго-западная часть эпицентральной области расположена на северной окраине кальдеры Санторин и направлена на северо-восток параллельно грабену Амаргос в сторону кальдеры вулкана Колумбо, охватывая по ширине цепочку 24 мелких подводных конусов вулканического комплекса Санторин-Колумбо, представляющего собой один из самых активных вулкано-тектонических линеаментов ЭВД. На этом линеаменте расположено более 90 сегментов насыщенных магматических даек и более 15 мелких разнонаправленных разрывных нарушений в области вулкана Колумбо. Распределение эпицентров землетрясений $M \geq 5$ в виде роя, указывает на то, что преобладающее большинство их сосредоточено в северо-восточной части подножия вулканического сооружения Колумбо, на расстоянии от 7 до 18 км, образуя в центральной части эпицентральной области веерообразный кластер наиболее сильных землетрясений.

Таблица 2/ Table 2

**Основные параметры и тензорные составляющие очагов 14 сильных
землетрясений с магнитудами $M > 5.0$ /
Main parameters and tensor components of the foci of 14 strong earthquakes
with magnitude $M > 5.0$**

День. Месяц/ Day, month	ч.м.с. / h.m.s	Координаты / Coordinate		Глубина/ Depth	Магнитуда / Magnitude	Скалярный сейсмич. момент $M_0 \cdot 10^{16}$ / scalar seismic moment $M_0 \cdot 10^{16}$	Тензорные составляющие $M_{RTP} \cdot 10^{16}$ сейсмического момента / Tensor components $M_{RTP} \cdot 10^{16}$ of the seismic moment					
		φ^0N	λ^0E				RR	TT	PP	RT / TR	RP / PR	TP / PT
03.02	9:29:43	36.62	25.67	5	5	2.04	-1.78	1.49	0.29	0.17	-0.78	0.88
04.02	2:46:06	36.6	25.65	7	5.1	1.33	-1.22	0.74	0.48	-0.14	-0.28	0.73
04.02	13:04:14	36.56	25.61	9	5.3	3.92	-3.14	2.14	1.00	-0.14	-0.41	2.73
05.02	19:09:38	36.65	25.64	10	5.1	3.62	-3.41	2.18	1.23	-0.12	-0.57	1.95
07.02	7:16:15	36.56	25.63	7	5.1	1.15	-0.80	0.44	0.36	0.14	-0.38	0.83
08.02	9:00:41	36.56	25.60	8	5.1	1.36	-1.11	0.88	0.38	0.04	-0.53	0.73
09.02	19:05:39	36.66	25.61	15	5.2	5.60	-3.39	3.50	-0.11	0.01	-2.17	3.85
10.02	20:16:29	36.7	25.72	8	5.2	7.08	-3.35	6.13	-2.79	-0.68	1.39	4.41
10.02	22:37:25	36.65	25.66	8	5.1	2.53	-2.40	1.60	0.80	0.02	-0.08	1.40
12.02	1:14:55	36.57	25.63	10	5.1	2.91	-2.44	1.98	0.47	0.84	-1.23	1.08
12.02	8:29:51	36.6	25.60	10	5	1.50	0.25	1.27	-1.52	0.10	0.47	0.16
17.02	7:49:50	36.61	25.68	6	5	1.68	-1.31	0.81	0.49	0.04	-0.47	1.14
18.02	4:46:52	36.62	25.84	8	5.1	2.30	-2.21	1.46	0.74	0.38	-0.51	1.05
18.02	6:08:09	36.61	25.62	8	5.1	1.07	-0.98	0.39	0.59	0.24	-0.28	0.54

Для определения общего объёма геологической среды, охваченной процессом активизации, используя данные, приведённые в таблице 1, нами было рассмотрено распределение гипоцентров сейсмических событий по глубине залегания в земной коре и верхней мантии. С этой целью гипоцентры сейсмических событий были спроектированы на вертикальную плоскость, проходящую по длине протяжённой оси эпицентрального поля по разрезу AA' (рис. 4).

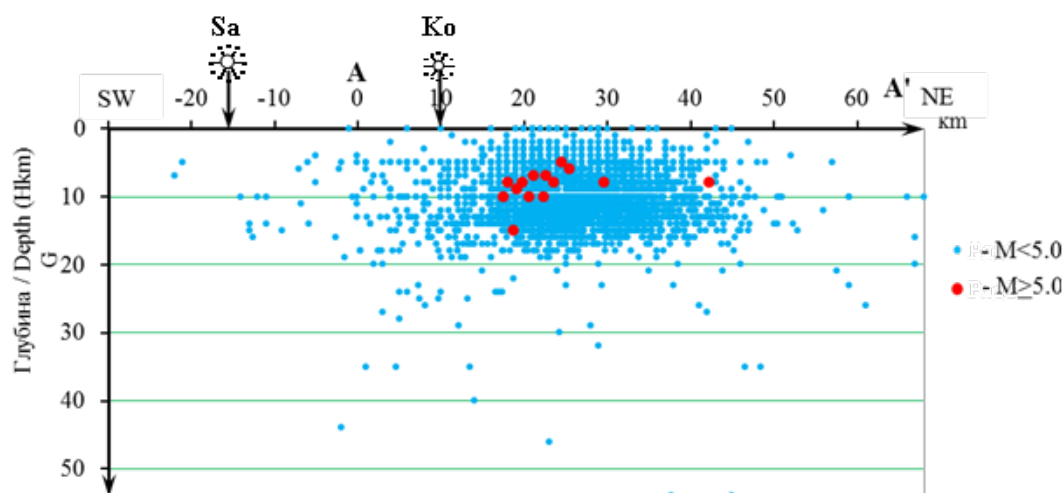


Рис. 4. Проекция гипоцентров сейсмических событий по разрезу AA' (см. рис. 3) /
Fig. 4. Projection of hypocenters of seismic events along the AA' section (see fig. 3)

Анализ распределения гипоцентров сейсмических событий по глубине их залегания указывает на то, что основной массив гипоцентров сосредоточен в земной коре в диапазоне глубин от 3 до 15 км. Наряду с этим, по всей длине разреза наблюдается редкое количество гипоцентров сейсмических событий, которые углубляются в верхнюю мантию до 35 км. Характерной особенностью этого распределения является то обстоятельство, что очаги наиболее сильных землетрясений магнитудной группы $4.8 \leq M \leq 5.3$, располагаются в земной коре на глубинах от 4 до 10 км. На основе параметров трёхмерного пространственного распределения эпицентров, оценен общий объем сейсмогенеза области аномального процесса активизации, который в первом приближении составляет $V \approx 2,0 \cdot 10^4 \text{ км}^3$. В этом объеме по вертикали отражаются изменения реологических свойств и анизотропное состояние вулканогенной, насыщенной флюидами геологической среды, приводящие по мере углубления в земную кору к хрупкому и квазихрупкому разрушению. Следует отметить, что квазихрупкое разрушение в этой геологической среде сконцентрировано, в толще земной коры на глубине от 4 до 10 км.

Это распределение указывает, что аномальный процесс сейсмической активизации происходил в первом мелководном кластере сейсмичности в сейсмогенной зоне БВЗ, в пределах Эгейской плиты, в области магматического резервуара, питающего вулканический комплекс Санторин-Колумбо.

Для определения типов сейсмических подвижек в очагах наиболее сильных сейсмических событий, нами рассмотрены решения фокальных механизмов более 48 землетрясений в магнитудном диапазоне $4.5 \leq M \leq 5.3$, приведенные на сайтах Гарвардского университета (США) и NOA (Греция), эпицентры которых, как по латерали, так и по глубине залегания, расположены по всей протяженности эпицентрального поля. Анализ азимутальной направленности нодальных плоскостей в очагах этих землетрясений показывает, что они ориентированы с севера-востока $\Phi_s = 30^\circ \div 60^\circ$ на юго-запад $\Phi_s = 225^\circ \div 255^\circ$ (STRK), с углами падения в диапазоне $30^\circ \div 60^\circ$ (DIP). Сейсмические подвижки в очагах этих землетрясений варьируются в интервале $\lambda = -75^\circ \div -105^\circ$ (SLIP). Наблюдаются редкие случаи, когда значения сейсмотектонических подвижек $\lambda = -35^\circ \div -45^\circ$ (SLIP) связаны с внедрением в очагах этих землетрясений сдвиговой составляющей. Анализ решения фокальных механизмов указывает, что в очагах этих землетрясений имеют место чисто сбросовые и сбросо-сдвиговые подвижки.

С целью определения вулканической природы и их типов в аномальном процессе роевых землетрясений, нами рассмотрено наличие в нем общепринятых характерных признаков вулканических землетрясений, каковыми являются расположение эпицентров вблизи окрестностей вулканического сооружения, глубина залегания их очагов, решение их фокальных механизмов, особенности волновых картин сейсмограмм, а также количественные метрики частотных характеристик, длительность и полный момент тензора (МТ) очагового излучения.

Как известно, по особенностям их проявления вулканические землетрясения, согласно международной классификации, подразделяются на четыре основных типа: высокочастотные, так называемые вулкано-тектонические (тип А), низкочастотные (тип В), эксплозивные (взрывные) и вулканическое дрожание [Minakami, 1960]. Каждый из этих типов землетрясений имеет свои характерные особенности волновых проявлений на сейсмограммах, которые детально рассмотрены в работе Гордеева Е.И. [Гордеев, 2007].

Для этой цели, нами отдельно изучены фокальные механизмы 14 роевых землетрясений с магнитудой $M \geq 5.0$. На рисунке 3 приведены стереограммы этих землетрясений, а количественные значения тензорных компонентов их сейсмических моментов, указаны в таблице 2. Решение фокальных механизмов показывает, что в очагах 12 землетрясений действует дипольная сила с преобладанием отрицательных значений тензорных компонентов полного сейсмического момента, приводящая к чисто сбросовым подвижкам.

Для определения типа этих вулканических землетрясений нами рассмотрены волновые картины их сейсмограмм, зарегистрированных в цифровом формате, на сейсмогеодинамических станциях современной автоматизированной системы наблюдений Армении.

Анализ сейсмограмм показывает, что волновые формы и длительность записи 10 землетрясений практически идентичны. На рисунке 5(а) приведена сейсмограмма землетрясения от 04.02.2025 г., показывающая характерную для всех землетрясений волновую картину последовательного вступления различных сейсмических волн и их затухание. На всех сейсмограммах отчетливо выделяются вступления фаз Р и S-волн.

В группе поверхностных волн выделяются несколько плавно затухающих цуг волн с продолжающимся длинным хвостом, по всей вероятности отражающим неоднородности в области вулканических сооружений. Характерные особенности волновых картин сейсмограмм, указывают на их принадлежность к группе А, т.е. к вулcano-тектоническим землетрясениям. Гипотетический центр роевых землетрясений, по всей вероятности, приурочен к области магматической камеры вулкана Колумбо. Иная волновая картина наблюдается на сейсмограммах двух землетрясений, приведенных в таблице 2, под номерами 7 и 8, одна из которых представлена на рисунке 5(б).

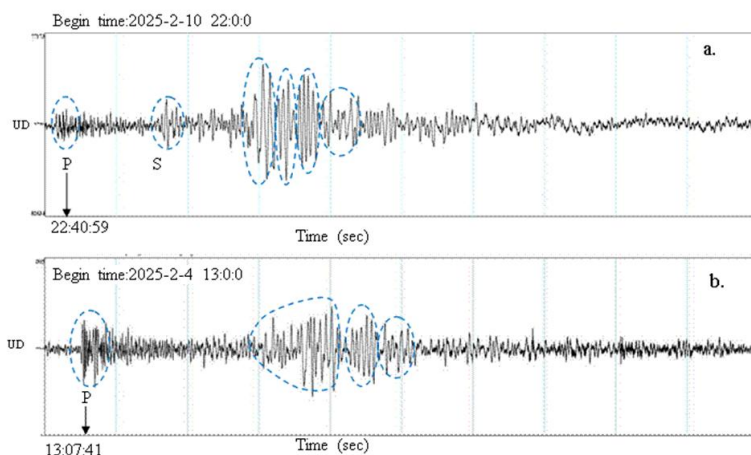


Рис. 5. Сейсмограммы землетрясений 4 (а) и 10 (б) февраля 2025 г., записанные на станции "BRKH" /

Fig. 5. Seismograms of the earthquakes of February 4 (a) and 10 (b) 2025, recorded at the "BRKH" station

На сейсмограмме вступление продольной волны Р характеризуется резким начальным импульсом, вступление поперечной волны S не отчетливое, размазанное. Волновой состав поверхностных волн представлен несколькими цугами с плавным

убыванием, а их продолжительность превышает длительность поверхностных волн вышеуказанных вулcano-тектонических землетрясений более чем на одну минуту. Анализ частотного состава поверхностных волн указывает на наличие узкой полосы низкочастотных колебаний в диапазоне $0.15 \div 0.2$ Гц. Выделение характерных особенностей волновых картин этих двух землетрясений указывает на их принадлежность к вулканическим землетрясениям типа В. Глубина залегания очагов этих землетрясений ($h \approx 5 \div 7$ км) непосредственно соответствует положению в магматической камере вулкана Колумбо, объемом 1.4 км^3 . Кратное превышение значений девятых компонентов полного сейсмического момента по отношению к их главным шаровым компонентам для этих двух землетрясений указывает на то, что в магматической камере, возможно, происходил процесс инфляции в виде магматического расплава, выбросов газа или обрушения кровли.

Особый интерес представляют результаты исследования большого количества более слабых землетрясений, возникших в период этой активизации по всей протяженности вулcano-тектонического линеамента Санторин-Амаргос. Большая удаленность наших сейсмических станций, от указанных сейсмических событий ($\Delta \approx 1700$ км), не позволила провести изучение частотных характеристик и процесс формирования полного момента тензора (МТ) очаговых излучений этих землетрясений. Детальное исследование было реализовано в NOA на основе изучения сейсмограмм более близких сейсмических станций ($\Delta \approx 40\text{--}300$ км) [Fountoulakis, Evangelidis, 2025]. Изучение частотных составляющих (FI) и формирования полного момента тензоров (МТ) очаговых излучений сейсмических событий от подножия вулкана Колумбо по направлению на северо-восток к грабену Амаргос показало, что преобладают высокочастотные вулcano-тектонические землетрясения типа А, с постепенным переходом от чисто сбросовых к сбросо-сдвиговым подвижкам. Иной характер имеют количественные метрики частоты и формирования полного момента тензоров очаговых излучений сейсмических событий, расположенных к юго-западу от вулкана Колумбо, вдоль 19 мелких вулканических построек, в направлении кальдеры вулканического сооружения Санторин [Bozkurt, Bozkurt, 2009]. Здесь, в очагах слабых землетрясений, наблюдаются низкочастотные значения FI, а при формировании МТ предполагается участие магматических флюидных процессов.

Обобщая результаты анализа пространственно-временнo-энергетического распределения эпицентров землетрясений, решения фокальных механизмов их очагов, волновых картин сейсмограмм роя землетрясений ($M \geq 5.0$) и спектральные особенности очаговых излучений большого количества слабых землетрясений, приходим к выводу, что весь аномальный процесс имеет вулканическую природу возникновения и отображает глубинные процессы магматической деятельности по всей протяженности подводного вулcano-тектонического линеамента Санторин-Амаргос.

Для адекватной интерпретации аномального проявления кратковременной активизации сейсмичности нами рассмотрена динамика ее развития во времени.

Для изучения динамики развития всего аномального процесса во времени с 25.01.25 г. по 06.03.25 г., нами рассмотрен ход ежесуточной частоты сейсмических событий в общем магнитудном диапазоне $M=2 \div 5$ с разложением их по каждой магнитудной группе с шагом $\Delta m=0.5$. На рисунке 6 представлен график-гистограмма ежесуточной частоты сейсмических событий, за период с 25.01.25 г. по 28.02.25 г., в пределах которого наблюдалось наиболее интенсивное проявление аномального процесса.

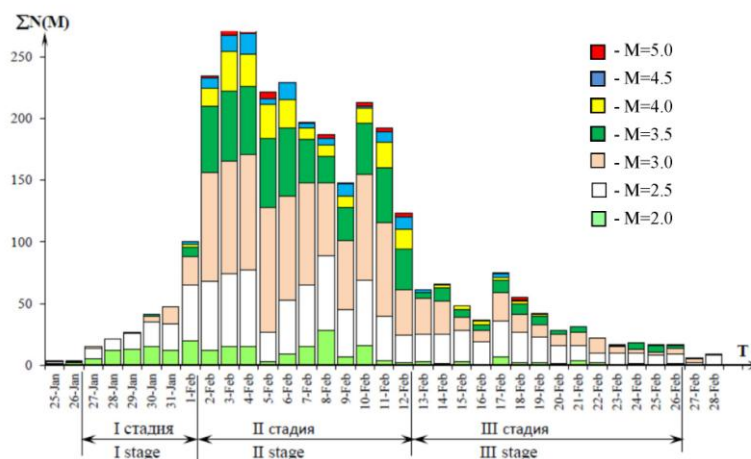


Рис. 6. График количественного распределения землетрясений по magnitude (M) за период наблюдений (T) /

Fig. 6. Graph of the quantitative distribution of earthquakes by magnitude over the observation period (T)

Анализ графика-гистограммы позволяет общую продолжительность всего аномального процесса разложить на 3 временные стадии, соответствующие 6, 10 и 15 суткам.

Первая стадия соответствует началу процесса активизации и характеризуется трендом нарастания значений суточной частоты от 15 до 100 событий, с последующим резким переходом ко второй стадии. Вторая стадия характеризуется наиболее интенсивным проявлением сейсмических событий со средним уровнем $n=200$ ежесуточных значений частоты и, по сути, является началом основной стадии процесса вулканической активизации. Период третьей стадии – плавный спад интенсивности проявления сейсмических событий от 120 до 17 значений, и, при этом с 12.02 по 19.02 частота возникновения сейсмических событий в магнитудной группе $M=4.5 \div 5$ сохраняется. Процесс активизации второй и третьей стадии не монотонный. Выделяются временные фазы возникновения импульсно куполообразных всплесков флуктуации сейсмичности продолжительностью от двух до пяти дней, в пределах которых наблюдаются одновременные возникновения землетрясений с магнитудами $M=2 \div 5$. Эти флуктуации прерываются двумя бухтообразными снижениями уровней, в пределах которых возникновение землетрясений с магнитудами значений $M=4.5 \div 5$ сохраняется. В общем процессе наличие таких аномальных флуктуаций показывает, что этот процесс отображает одновременное возникновение кратковременного биения магматической камеры подводного дремлющего вулкана Колумбо и тремора всего протяженного подводного вулcano-тектонического линейамента Санторин-Амаргос. По всей вероятности, выявленная активизация связана с дополнительной инъекцией магматического вещества, в виде флюидов, из верхней мантии в магматический резервуар, в область вулканического сооружения Колумбо, и ее диффузии по всей протяженности подводного вулcano-тектонического линейамента.

Возникновение большого количества сейсмических событий, в магнитудном диапазоне $M=2 \div 5$, является следствием миграции этой диффузии, приводящей к разрывам многочисленных, разномасштабных магматических даек, насыщенных по всей протяженности вулcano-тектонического линейамента.

Исследуемый нами процесс является одной из аномальных форм проявления сложных процессов вулcano-тектонического взаимодействия. Большинство случаев вулcano-тектонических землетрясений предваряются и сопровождаются извержением магмы или выбросом газов из кратеров активных вулканов. Подобные вулканические явления, при наблюдаемой нами сейсмической активности, не зафиксированы.

В этой связи, необходимо отметить, что в работах [Родкин, Андреева 2025а, 2025б] на основе изучения сейсмичности вулканически активной Курило-Камчатской зоны с «окном» 100 дней до события при подготовке крупных ($M \geq 6.5$) тектонических землетрясений, очаги которых расположены в верхней мантии на глубине в несколько десятков км, происходит прорыв легких флюидов из верхней мантии в поверхностные слои земной коры.

После окончания наблюдаемого нами в течение 100 дней процесса аномальной активизации слабой сейсмичности на расстоянии 80 км южнее вулcano-тектонического линеамента Санторин-Амаргос, 22.05.2025 г. произошло крупное землетрясение с магнитудой $M=6.2$, гипоцентр которого был расположен в верхней мантии на глубине 58 км.

По всей вероятности, выявленная активизация связана с дополнительной инъекцией легких флюидов из верхней мантии под воздействием предельных упругих напряжений в очаговой области в магматический резервуар, питающий тектонический линеament Санторин-Амаргос, в область вулканического сооружения Колумбо.

Выводы

Вулканы Санторин, Колумбо и Нисирос являются наиболее активными т.н. «Горячими точками» Эгейской вулканической дуги, где активные мантийные плюмы внедряются в магматические резервуары, способствуя их активизации. Этот процесс можно принять в качестве одной из основных причин возникновения аномальных проявлений сейсмичности в виде умеренных и слабых сейсмических событий в окрестности вулканических структур.

Выявленные закономерности явления позволяют предположить, что причиной дополнительной инъекции легких флюидов из верхней мантии в магматический резервуар, питающий тектонический линеament Санторин-Амаргос, являются предельные упругие напряжения в очаговой области крупного тектонического землетрясения. При этом пространственно-временные параметры полностью укладываются в рамки вышеуказанных критериев подготовки крупных тектонических землетрясений. Поэтому достаточно длительная аномальная активизация слабой сейсмичности в пределах вулcano-тектонического линеамента предваряет тектонические землетрясения.

Проявленный повышенный интерес к изучению данного процесса обусловлен тем обстоятельством, что на Армянском Нагорье расположены крупные вулканические сооружения Арарат, Арагац, Ардаган, Сипан, Немрут, Тондрак, а на Большом Кавказе – Эльбрус, Казбек, сейсмические условия которых по ряду объективных причин с рассмотренной точки зрения слабо изучены [Abrehdari et al., 2022].

Автоматизированная система сейсмогеодинамических наблюдений Армении, включающая армянскую и китайскую аппаратуру, уверенно регистрирует слабые землетрясения с пороговым магнитудным уровнем $M \geq 1.5$, по всей территории Кавказского региона.

Выдвигаемые нами выводы не претендуют на однозначность, и являются предметом широкой научной дискуссии, в ходе которой на основе результатов дополнительных исследований, гипотеза может быть подтверждена или опровергнута.

Литература

1. Апродов В.А. Зоны землетрясений. М.: Мысль, 2000. – 461 с.
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. $M_w = 7.8$ 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 ($M_w=7,8$). // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. № 4. – С. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004.
4. Гордеев Е.И. Сейсмичность вулканов и контроль вулканической активности. // *Вестник Дальневосточного отделения РАН*. – 2007. – № 2(132). – С. 38–45.
5. Родкин М.В., Андреева М.Ю. О проявленности типовых предвестниковых аномалий в форшоковых областях сильных землетрясений, Курило-Камчатский регион. // *Вулканология и сейсмология*. – 2025а. – № 2. – С. 62–72. DOI: 10.31857/S0203030625010053.
6. Родкин М.В., Андреева М.Ю. Уточнение характера типовых предвестниковых аномалий для разноглубинных землетрясений Курило-Камчатский регион. // *Геодинамика и тектонофизика*. – 2025б. – Т. 16. № 1. 0811. DOI: 105800/GT-2025-16-1-0811.
7. 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. – Т. 15. № 3. – С. 8–23. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001.
8. Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Альпийский Средиземноморский пояс. М.: Недра, 1984. – 344 с.
9. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. The Caucasus territory hot-cold spots determination and description using 2D surface waves tomography. // *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2022. – Vol. 22. – ES5004. DOI: 10.2205/2022ES000814.
10. Ambraseys N., Adams R. The Rhodes earthquake of 26 June 1926. // *Journal of Seismology*. – 1998. – Vol. 2. – pp. 267–292.
11. Bohnhoff M., Rische M., Meier T., Becker D., Stavrakakis G., Harjes. H.-P. Microseismic activity in the Hellenic Volcanic Arc, Greece, with emphasis on the seismotectonic setting of the Santorini-Amorgos zone. // *Tectonophysics*. – 2006. – Vol. 423. No. 1. – pp. 17–33. DOI: 10.1016/j.tecto.2006.03.024.
12. Bozkurt C.N., Bozkurt E. Pattern of normal faulting in the Gediz Graben, SW Turkey. // *Tectonophysics*. – 2009. – Vol. 473. No. 1. – pp. 234–260. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.05.036.
13. Brustle A. Seismicity of the eastern Hellenic Subduction Zone. Ph.D. thesis. Bochum: Ruhr University, 2012. – 151 p.
14. Casten U., Snopek K. Gravity modelling of the Hellenic subduction zone – a regional study. // *Tectonophysics*. – 2006. – Vol. 417. No. 3. – pp. 183–200. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.11.002.
15. Chamot-Rooke N., Rangin C., Le Pichon X. DOTMED: A synthesis of deep marine data in the eastern Mediterranean: book. Mem. Soc. Geol. France, 2005. Vol. 177, – 64 p.
16. Drymonis K., Browning J., Gudmundsson A. Spatial and temporal volcanotectonic evolution of Santorini volcano, Greece. // *Bulletin of Volcanology*. – 2022. – Vol. 84. No. 6. – pp. 1–18. DOI: 10.1007/s00445-022-01566-4.

17. Fountoulakis I., Evangelidis C.P. The 2024–2025 seismic sequence in the Santorini-Amorgos region: Insights into volcano-tectonic activity through high-resolution seismic monitoring. // *Seismica*. – 2025. – Vol. 4. No. 1. – DOI: 10.26443/seismica.v4i1.1663.
18. Hill D.P., Reasenber P.A., Michael A. et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake. // *Science*. – 1993. – Vol. 260. – pp. 1617–1623.
19. Karagianni E., Papazachos C. Shear velocity structure in the Aegean region obtained by joint inversion of Rayleigh and Love waves. // *Geological Society London Special Publications*. – 2007. – Vol. 291. No. 1. – pp. 159–181. DOI: 10.1144/SP291.8.
20. Karapetyan J., Li L., Geodakyan E., Yuan S.Y., Karapetyan R. Site survey and assessment for the planned seismogeodynamic monitoring network in the Republic of Armenia. // *Earthquake Science*. – 2022. – No. 35. – p. 487–495. DOI: 10.1016/j.eqs.2022.12.004.
21. Karapetyan J., Li L., Zhou J., Hovhannisyan L., Wang Y., Karapetyan R., Gevorgyan A., Harutyunyan K. The problems of declustering in the processing of seismic information in the Tauro Caucasus Region. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 2024. – Vol. 114. – pp. 2008–2027. DOI: 10.1785/0120230291.
22. Klaver M., Carey S., Nomikou P., Smet I., Godelitsas A., Vroon P. A distinct source and differentiation history for Kolumbo submarine volcano, Santorini volcanic field, Aegean Arc. // *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. – 2016. – Vol. 17. No. 8. – pp. 3254–3273. DOI: 10.1002/2016GC006398.
23. Minakami T. Fundamental research for prediction of volcanic eruption. Pt I. // *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. – 1960. – Vol. 38. – pp. 497–544.
24. Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D., Alexandri M., Bejelou K. Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera, Greece. // *Global and Planetary Change*. – 2012. – Vol. 90–91. – pp. 135–151. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.01.001.
25. Reilinger R., McClusky S., Paradissis D., Ergintav S., Vernant P. Geodetic constraints on the tectonic evolution of the aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone. // *Tectonophysics*. – 2010. – Vol. 488. Issue 1–4. – pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.05.027.
26. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F. et al. GPS constraints on continental deformation in the African-Arabian-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 2006. – Vol. 111. No. (B5):B05411. – pp. 1–26. DOI: 10.1029/2005jb004051.

References

1. Aprodov V.A. *Earthquake Zones*. Moscow. Mysl. 2000. 461 p. (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 $M_w=7.8$ as a destruction process in focal area. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 3. pp. 71–84. DOI: 10.46698/u8883-5565-8869-f. (In Russ.)
3. Geodakyan E.G., Karapetyan J.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 ($M_w=7.8$). *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. Gordeev E.I. Seismicity of volcanoes and monitoring of volcanic activity. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2007. No. 2(132). pp. 38–45. (In Russ.)
5. Rodkin M.V., Andreeva M.Yu. On the manifestation of typical precursor anomalies in foreshock areas of strong earthquakes, Kuril-Kamchatka region. *Volcanology and Seismology*. 2025a. No. 2. pp. 62–72. DOI: 10.31857/S0203030625010053. (In Russ.)

6. Rodkin M.V., Andreeva M.Yu. Clarification of the nature of typical precursor anomalies for earthquakes of varying depths in the Kuril-Kamchatka region. *Geodynamics and Tectonophysics*. 2025b. Vol. 16. No. 1. 0811. DOI: 105800/GT-2025-16-1-0811. (In Russ.)
7. Svalova V.B. Geodynamics, geothermics and seismicity of the Caucasus-Anatolian-Arabian region and the earthquake in the Sea of Marmara (Turkey) on 23 April 2025. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2025. Vol. 15. No. 3. pp. 8–23. DOI: 10.46698/VNC.2025.78.36.001. (In Russ.)
8. Khaine V.E. *Regional Geotectonics. Alpine-Mediterranean Belt*. Moscow. Nedra. 1984. 344 p. (In Russ.)
9. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., Geodakyan E. The Caucasus territory hot-cold spots determination and description using 2D surface waves tomography. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2022. Vol. 22. ES5004. DOI: 10.2205/2022ES000814.
10. Ambraseys N., Adams R. The Rhodes earthquake of 26 June 1926. *Journal of Seismology*. – 1998. Vol. 2. pp. 267–292.
11. Bohnhoff M., Rische M., Meier T., Becker D., Stavrakakis G., Harjes. H.-P. Microseismic activity in the Hellenic Volcanic Arc, Greece, with emphasis on the seismotectonic setting of the Santorini-Amorgos zone. *Tectonophysics*. 2006. Vol. 423. No. 1. pp. 17–33. DOI: 10.1016/j.tecto.2006.03.024.
12. Bozkurt C.N., Bozkurt E. Pattern of normal faulting in the Gediz Graben, SW Turkey. *Tectonophysics*. 2009. Vol. 473. No. 1. pp. 234–260. DOI: 10.1016/j.tecto.2008.05.036.
13. Brustle A. Seismicity of the eastern Hellenic Subduction Zone. Ph.D. thesis. Bochum. Ruhr University. 2012. 151 p.
14. Casten U., Snopek K. Gravity modelling of the Hellenic subduction zone – a regional study. *Tectonophysics*. 2006. Vol. 417. No. 3. pp. 183–200. DOI: 10.1016/j.tecto.2005.11.002.
15. Chamot-Rooke N., Rangin C., Le Pichon X. DOTMED: A synthesis of deep marine data in the eastern Mediterranean: book. *Mem. Soc. Geol. France*. 2005. Vol. 177. 64 p.
16. Drymoni K., Browning J., Gudmundsson A. Spatial and temporal volcanotectonic evolution of Santorini volcano, Greece. *Bulletin of Volcanology*. 2022. Vol. 84. No. 6. pp. 1–18. DOI: 10.1007/s00445-022-01566-4.
17. Fountoulakis I., Evangelidis C.P. The 2024–2025 seismic sequence in the Santorini-Amorgos region: Insights into volcano-tectonic activity through high-resolution seismic monitoring. *Seismica*. 2025. Vol. 4. No. 1. DOI: 10.26443/seismica.v4i1.1663.
18. Hill D.P., Reasenber P.A., Michael A. et al. Seismicity remotely triggered by the magnitude 7.3 Landers, California, earthquake. *Science*. 1993. Vol. 260. pp. 1617–1623.
19. Karagianni E., Papazachos C. Shear velocity structure in the Aegean region obtained by joint inversion of Rayleigh and Love waves. *Geological Society London Special Publications*. 2007. Vol. 291. No. 1. pp. 159–181. DOI: 10.1144/SP291.8.
20. Karapetyan J., Li L., Geodakyan E., Yuan S.Y., Karapetyan R. Site survey and assessment for the planned seismogeodynamic monitoring network in the Republic of Armenia. *Earthquake Science*. 2022. No. 35. p. 487–495. DOI: 10.1016/j.eqs.2022.12.004.
21. Karapetyan J., Li L., Zhou J., Hovhannisyan L., Wang Y., Karapetyan R., Gevorgyan A., Harutyunyan K. The problems of declustering in the processing of seismic information in the Tauro Caucasus Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 2024. Vol. 114. pp. 2008–2027. DOI: 10.1785/0120230291.
22. Klaver M., Carey S., Nomikou P., Smet I., Godelitsas A., Vroon P. A distinct source and differentiation history for Kolumbo submarine volcano, Santorini volcanic field, Aegean Arc. *Geochemistry. Geophysics. Geosystems*. 2016. Vol. 17. No. 8. pp. 3254–3273. DOI: 10.1002/2016GC006398.
23. Minakami T. Fundamental research for prediction of volcanic eruption. Pt I. *Bulletin of the Earthquake Research Institute*. 1960. Vol. 38. pp. 497–544.
24. Nomikou P., Carey S., Papanikolaou D., Croff Bell K., Sakellariou D., Alexandri M., Bejelou K. Submarine volcanoes of the Kolumbo volcanic zone NE of Santorini Caldera,

Greece. *Global and Planetary Change*. 2012. Vol. 90–91. pp. 135–151. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2012.01.001.

25. Reilinger R., McClusky S., Paradissis D., Ergintav S., Vernant P. Geodetic constraints on the tectonic evolution of the aegean region and strain accumulation along the Hellenic subduction zone. *Tectonophysics*. 2010. Vol. 488. Issue 1-4. pp. 22–30. DOI: 10.1016/j.tecto.2009.05.027.

26. Reilinger R., McClusky S., Vernant P., Lawrence S., Ergintav S., Cakmak R., Ozener H., Kadirov F. et al. GPS constraints on continental deformation in the African-Arabian-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2006. Vol. 111. No. (B5):B05411. pp. 1–26. DOI: 10.1029/2005jb004051.