

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004

Оригинальная статья

Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения ($M_w = 7,8$)

Э.Г. Геодакян^{1,3}, Дж.К. Карапетян^{1,3}, В.Б. Заалишвили², Б.В. Саакян¹,
С.М. Оганесян^{1,3}, М.А. Мкртчян¹, Г.А. Мкртчян¹

¹Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. А. Назарова НАН РА,
Республика Армения, 3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна 5;

²Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а;

³Международный научно-образовательный центр НАН РА,
Республика Армения, 0019, г. Ереван, ул. Маршала Баграмяна 24,

e-mail: geodakyan.e@mail.ru

Статья поступила: 20.10.2023, доработана: 24.11.2023, принята к публикации: 04.12.2023

Резюме: Актуальность работы. В работе рассматривается сложная структура взаимодействия крупных макро и мезоплит. Под воздействием близмеридиональных тектонических напряжений мобильная Аравийская плита, со средней скоростью 30 мм·год⁻¹, вклинивается в орогенные структуры Малого и Большого Кавказа, раздвигая по флангам Анатолийскую и Черноморскую мезоплиты на запад, а Южно-Каспийскую и Иранскую мезоплиты на восток. **Методы.** На основе анализа пространственного распределения очагов сильнейших землетрясений региона, с $M \geq 6.7$ за период с 1900 г. по настоящее время, показана их приуроченность к основным глубинным разломам. Очаги первых двух сильнейших землетрясений от 06.02.23 с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.5$ расположены на Восточно-Анатолийском разломе, близ городов Газиантеп и Караманмараш и т.д. **Результаты.** На основе анализа параметров фокальных механизмов землетрясений от 06.02.23, выдвинута версия, что они являются «дуплет»-землетрясениями, которые послужили триггерным механизмом для возникновения землетрясения от 20.02.23 с $M_w = 6.3$. Анализ инструментальных данных Газиантепского (Турция) землетрясения с $M_w = 7.8$ позволил определить параметры и спектральные характеристики очагового излучения. Установлено, что магистральный разрыв представляет сложный нелинейный процесс разрывообразования и включает 4 субочага. Геодинамическая модель землетрясения помогла выявить основные закономерности и характерные особенности разрывообразования очагов и оценить картину сейсмогенеза.

Ключевые слова: тектоника, глубинные разломы, очаг землетрясения, фокальный механизм, дуплет-землетрясения, магистральный разрыв, геодинамическая модель.

Благодарность: Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета по высшему образованию и науке РА (грант АСН-01/23, 21SCG-1E021).

Для цитирования: 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. 13(4): 42-54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004

DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004

Original paper

Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ($M_w=7.8$)

E.G. Geodakyan^{1,3}, Jh.K. Karapetyan^{1,3}, V.B. Zaalishvili², B.V. Sahakyan¹,
S.M. Hovhannisyan^{1,3}, M.A. Mkrtchyan¹, G.A. Mkrtchyan¹

¹Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of NAS RA,
5a V. Sargsyan Str., Gyumri 3115, Republic of Armenia;

²Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences,
93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation;

³International Scientific-Educational Center NAS RA,
24d Baghramyan Str., Erevan 0019, Republic of Armenia,
e-mail: geodakyan.e@mail.ru

Received: 20.10.2023, revised: 24.11.2023, accepted: 04.12.2023

Abstract: Relevance. The complex structure of interaction of major macro and mezoplates is presented in the paper. The mobile Arabian Plate under the influence of near-meridional tectonic stresses, with an average speed of 30 mm·year⁻¹, wedges into the orogenic structures of the Lesser and Greater Caucasus, pushing the Anatolian and Black Sea mezoplates to the west along the flanks, and the South Caspian and Iranian mezoplates to the east. **Methodology.** Based on the analysis of the spatial distribution of focal zones of strongest earthquakes of the region with $M \geq 6.7$ for the period 1900 to present days, their confinement to the main deep faults is shown. The focal zones of first two strongest earthquakes of 06 February 2023 with $M_w=7.8$ and $M_w=7.5$ are located on the East Anatolian Fault, near the cities of Gaziantep and Karamanmarash, etc. **Results.** Based on the analysis of parameters of focal mechanisms of the earthquakes 06 February 2023 a version has been put forward that these are “doublet” earthquakes that served as a trigger mechanism for the occurrence of the earthquake of 06 February 2023 with $M_w=6.3$. The analysis of instrumental data from the Gaziantep (Turkey) earthquake with $M_w=7.8$ made it possible to determine the parameters and spectral characteristics of the focal zone radiation. It has been determined, that the main rupture is a complex non-linear process of rupture propagation and involves 4 sub focal zones. The geodynamic model of the earthquake helped in identifying the main patterns and characteristic features of the rupture formation of sources and to assess the overall picture of seismogenesis.

Keywords: tectonics, deep faults, earthquake focal zone, focal mechanism, doublet earthquake, main rupture, geodynamic model.

Acknowledgment: This work was funded by the Higher Education and Science Committee of the Republic of Armenia, as part of the research project (No. ACH-01/23, 21SCG-1E021).

For citation: 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 ($M_w=7.8$). *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 42-54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004

Введение

Прогноз сильных землетрясений является одной из важных и пока еще окончательно не решенных проблем современной сейсмологии. Главной причиной труд-

ности решения этой проблемы является неустойчивый характер протекающих в геологической среде земной коры сложных геодинамических процессов. Согласно концепции о литосфере, как о сложной иерархической самоорганизующейся системе, сейсмический процесс дискретно отображает сложные тектонические движения, возникающие в зонах взаимодействия иерархически различных по масштабности структурных элементов в этой системе [Bak et al., 1988; Шебалин, 2020; Bak et al., 1988].

К ряду таких землетрясений относятся разрушительные землетрясения, произошедшие 06 и 20 февраля 2023 г. соответственно с магнитудами $M_w = 7.8$, 7.5 и 6.3 (<https://www.emsc-csem.org>; <https://deprem.afad.gov.tr>) в юго-восточной части крупного Восточно-Анатолийского трансформного разлома в области сочленения Евроазиатской, Африканской и Аравийской литосферных макроплит.

Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023 г.

С геотектонической позиции очаги первых 2-х землетрясений непосредственно расположены на трансформном Восточно-Анатолийском разломе, имеющем протяженность около 700 км. Очаг третьего землетрясения приурочен к участку сопряжения северной части близмеридионально направленного Левантийского разлома с юго-западной частью Восточно-Анатолийского разлома, близ города Латакия. Исследования тектонического строения региона проводились многими ведущими сейсмотектонистами [McKenzie, 1972; Brinkman, 1976; Габриелян и др., 1981; Караханян, 1995; Berberian, 1995; Габриелянц и др., 2002]. Согласно этим исследованиям, регион подразделяется на крупные Евразийскую, Африканскую, Аравийскую литосферные макроплиты, и Анатолийскую, Черноморскую, Южно-Каспийскую, Иранскую мезоплиты, которые разграничены протяженными трансрегиональными разнотипными разломными системами (рис.1).

В этой системе крупным трансрегиональным важнейшим является Северо-Анатолийский трансформный разлом, простирающийся по территории Турции с запада на восток, до города Эрзинджана, и разделяющий Анатолийскую и Черноморскую мезоплиты. Общая длина этого разлома составляет 1500 км. Аналогичным разломом является Восточно-Анатолийский разлом протяженностью около 700 км, простирающийся с севера от Левантийского разлома до Битлиса, и разделяющий Аравийскую макроплиту от Анатолийской мезоплиты. Оба вышеупомянутых разлома по своему характеру являются трансформными разломами, по которым в основном происходят чисто сдвиговые подвижки. Эти две системы разломов соединяются и образуют крупнейший дизъюнктивный Битлис-Эрзинджанский сейсмотектонический узел.

Северо-Анатолийский разлом в этом дизъюнктивном узле расчленяется на южную, центральную и северную ветви. Южная ветвь представляет собой клиновидную фронтальную зону коллизии Евразийской и Аравийской литосферных макроплит, которая простирается от Эрзинджана по направлению Битлис-Загрос, где стыкуется с Загросским разломом, отделяющим Аравийскую макроплиту от Иранской мезоплиты, формируя т.н. Курдистанский сейсмотектонический узел.

Центральная ветвь простирается на северо-восток, последовательно трассируя Эрзрум-Саригамиш-Памбак-Севан-Сюникскую разломную систему, отделяющую Южно-Армянский и Закавказский блоки.

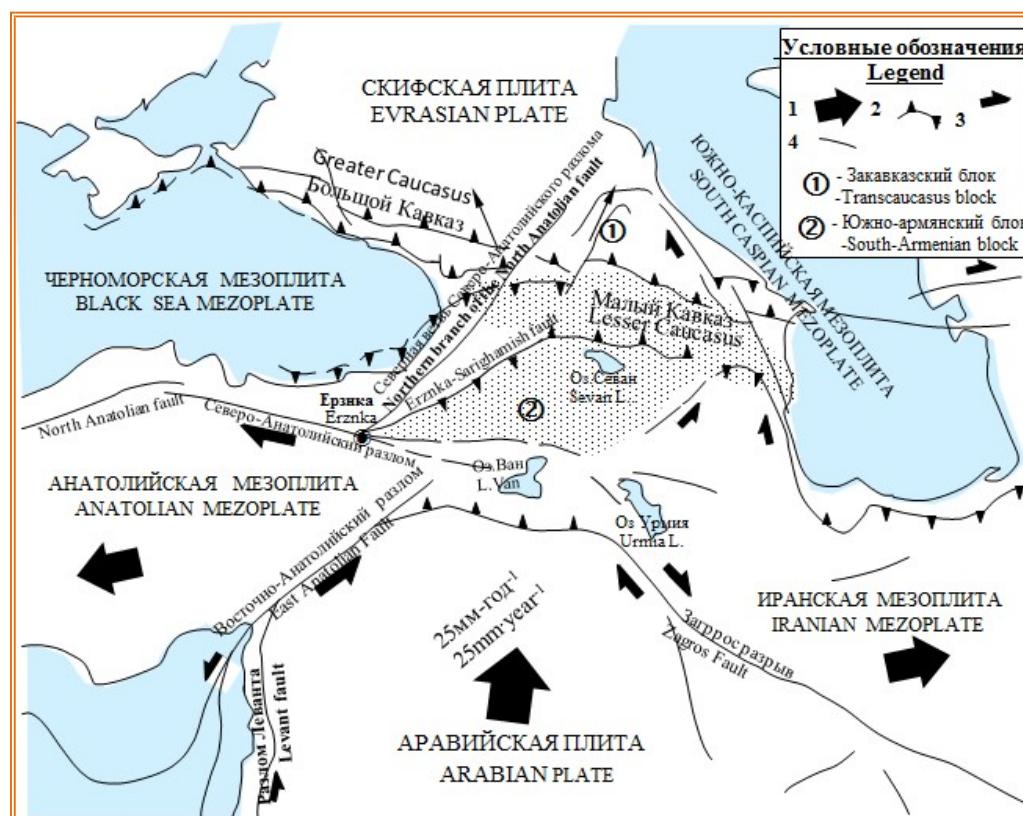


Рис. 1. Основные плитотектонические элементы и трансрегиональные глубинные разломы исследуемой территории /

Fig. 1. Main plate tectonic elements and transregional deep faults of the study area

Северная ветвь представляет собой левостороннюю шовную зону коллизии Евразийской и Аравийской макроплит, отделяющую Черноморскую мезоплиту от Южно-Армянского и Закавказского блоков.

На этой территории динамика взаимодействия крупнейших тектонических элементов литосферы в зонах их коллизии, оценка скоростей их относительных смещений, проводилась путем анализа количественных значений поля скоростей по данным GPS систем приведенных в работе [Reilinger et al., 2006]. Согласно этим исследованиям, Африканская и Аравийская плиты продвигаются к относительно неподвижной Евразийской платформе, со средними скоростями соответственно 5 мм/год и 30 мм/год.

Аравийская мезоплита по двум основным шовным зонам, представляющим собой крупные сейсмогенные линейменты, вклинивается в структуры Малого и Большого Кавказа, отодвигая Восточно-Черноморскую и Анатолийскую мезоплиты к западу, а Южно-Каспийскую и Иранскую мезоплиты к востоку. В центральной части расположены смежные с передовой зоной Аравийской плиты, выпуклые к северо-востоку, Южно-Армянский и Закавказский блоки, за счет близмеридионально направленного сжимающего тектонического напряжения образующие область коллизионной зоны столкновения [Габриелянц и др., 2002]. Нами рассмотрено пространственное распределение сильнейших $M \geq 6.8$ землетрясений исследуемой территории с 1900 г. по настоящее время (рис. 2).

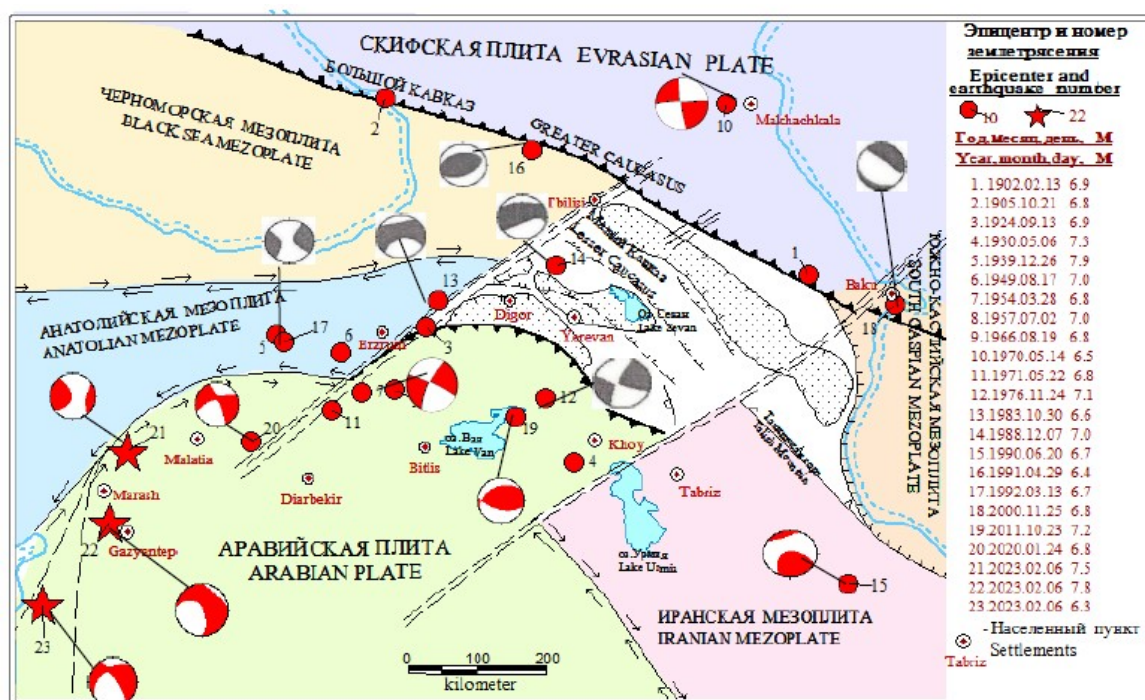


Рис. 2. Эпицентры и фокальные механизмы сильных $M \geq 6.8$ землетрясений исследуемой территории /

Fig. 2. Epicenters and focal mechanisms of strong $M \geq 6.8$ earthquakes in the study area

Как видно из рисунка 2 очаги этих землетрясений, как правило, расположены в краевых зонах взаимодействия вышеуказанных крупных литосферных макроплит.

Следует отметить, что решение фокальных механизмов выделенных очаговых зон произошедших сильных землетрясений, показывает, что из-за разницы между скоростями продвижения этих тектонических элементов в регионе происходят сложные, разнотипные сейсмодеоформационные процессы (www.emsc.org; www.globalcmt.org).

В основном, эти процессы протекают вдоль протяженных, региональных разломов, представляющих собой зоны контактов крупных, тектонических элементов. Относительные скорости сейсмодеоформационных процессов в этих зонах достигают величин $12,5 \cdot 10^{-7} \leq \dot{\epsilon} \leq 6,2 \cdot 10^{-7} \text{ год}^{-1}$ [McKenzie, 1972; Reilinger et al., 2006].

Землетрясения, происходящие в Загросской системе разломов, геометрически охватывают относительно большие пространственные размеры, образуя широкую полосу сейсмогенной области. Такая зональность обусловлена тем, что протекающие здесь правосторонние сдвиговые сеймотектонические подвижки одновременно сопровождаются взбросо-надвиговыми складкообразующими процессами. Иной характер имеет распределение очагов землетрясений в Восточно-Анатолийской системе разломов. В этой системе эпицентрально поле землетрясений образует геометрически узкую полосу, где по всей длине разлома наблюдаются левосторонние чисто сдвиговые подвижки. В отличие от сдвиговых подвижек фланговых зон Аравийской плиты, в ее передовой зоне коллизии с Южно-Армянским и Закавказским блоками, имеющими мозаично раздробленные микроблоковые строения, за счет

доминирующих в регионе субмеридионально направленных сжимающих сейсмотектонических напряжений, наблюдаются разнотипные, разноранговые сейсмотектонические подвижки [Гиоргобиани, 2020; Гиоргобиани, Закарая 2020; Abrehdari et al., 2023; Ismail-Zadeh et al., 2020; Karapetyan et al., 2023].

Именно в этом сложном геотектоническом поле, в юго-западной оконечности Восточно-Анатолийской системы разломов, произошли разрушительные Турецкие землетрясения.

Геодинамическая модель очага восточно-турецкого землетрясения 06 февраля 2023 г. $M_w=7,8$

Многочисленные экспериментальные исследования процессов разрывообразования и разработка на их основе теоретических моделей показывают, что процессы разрывообразования сильных землетрясений существенно влияют на такие факторы этой системы, какими являются поля напряжений, упругопластические деформации, геометрия разломов и их насыщенность флюидами, реология и вязкость геологической среды.

Следует отметить, что разрушительные и сильнейшие землетрясения в сейсмоактивных регионах возникают крайне редко. Детальное исследование их очаговых зон и построение адекватных моделей разрывообразования этих землетрясений вносят существенный вклад в понимание сейсмогенеза конкретного региона, в решение ряда фундаментальных проблем и в изучение физики очага землетрясения, в целом.

К таким землетрясениям относятся разрушительные землетрясения, произошедшие 06 и 20 февраля 2023 г., соответственно, с магнитудами $M_w = 7.8$, 7.5 и 6.3 в юго-восточной части крупного Восточно-Анатолийского трансформного разлома в области сочленения Евроазиатской, Африканской и Аравийской литосферных макроплит. Эти стихийные бедствия привели к многочисленным человеческим жертвам и почти полному разрушению ряда городов и населенных пунктов, в 5-ти провинциях юго-восточной части Турции и на приграничной с ней территории Сирии. Землетрясения были зарегистрированы сейсмическими станциями практически всех авторитетных мировых и региональных сейсмологических агентств. Решение фокальных механизмов этих землетрясений, а также многочисленные инструментальные регистрации волновых картин цифровых записей распространения объемных сейсмических волн на ближайших сейсмических станциях, наиболее полно обобщены и приведены в информационных бюллетенях Centre Sismologique Euro-Méditerranéen Euro-Mediterranean Seismological Centre (EMSC) и Disaster and Emergency Management Presidency, Earthquake Department (AFAD) (www.emsc-csem.org; depem.afad.gov.tr). Авторами была поставлена цель – на основе этих данных оценить напряженно-деформированное состояние очаговой области Газиантепского землетрясения, определить кинематические, динамические параметры, спектральные характеристики очагового излучения магистрального разрывообразования и построить его геодинамическую модель.

К основным кинематическим параметрам относятся длина, ширина и площадь плоскости магистрального разрывообразования, продолжительность и скорость этого процесса. На основе корреляционных зависимостей [Ризниченко, 1985] меж-

ду величиной магнитуды с протяженностью и шириной плоскости, а также продолжительностью протекания магистрального разрывообразования, был определен очаг Газиантепского землетрясения с магнитудой $M_w = 7.8$, который имеет протяженность 140 км, ширину 40 км и углубление в геологическую среду земной коры общей площадью $S = 5600 \text{ км}^2$, в которой в течение 38 секунд, со скоростью 2,4 км/с сформировался магистральный разрыв этого землетрясения. Проведен комплексный анализ параметров ориентации нодальных плоскостей и главных осей сжимающих и растягивающих напряжений с геометрией сейсмотектонических разрывов очаговой области. Восточно-Анатолийский разлом в очаговой области имеет сложную структуру геолого-тектонического строения, состоящую из 7 сегментов ступенчатообразных, кулисообразно расположенных разрывных нарушений, которые отделяют Анатолийскую плиту от Аравийской плиты [Lekkas et al., 2023]. В этой системе плоскость магистрального разрывообразования имеет ориентацию с юга-запада на северо-восток с азимутом 225° , с близвертикальным 85° углом падения в глубь земной коры, проекция которой на земную поверхность имеет ширину 15 км (рис. 3).

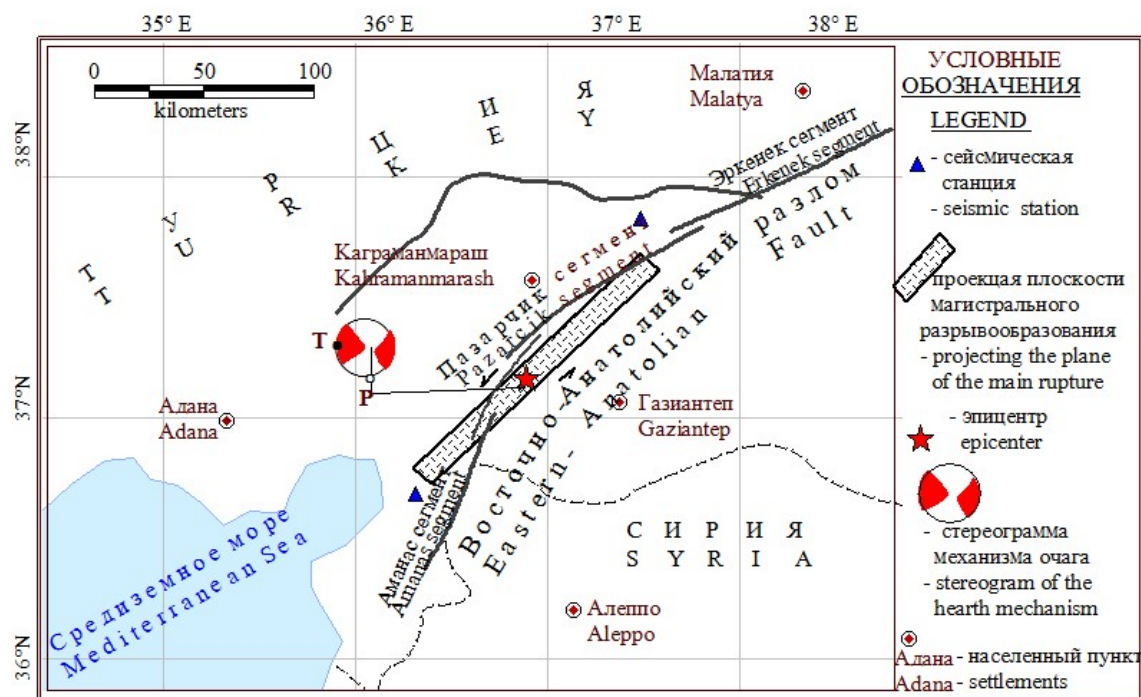


Рис. 3. Геолого-тектоническое строение и магистральный разрыв очага Газиантепского землетрясения /

Fig. 3. Geological-tectonic structure and main rupture of the source of the Gaziantep earthquake

Учитывая азимутальную ориентацию плоскости магистрального разрывообразования и ее угол падения относительно горизонта земной поверхности, противоположные грани плоскости разрыва представляют собой, т.н. «висячие» и «лежащие» борта мгновенного, относительного смещения разрыва и приуроченные к Аравийской и Анатолийской макроплитам, соответственно. Анализ разности времен вступлений объемной, продольной P_{max} волны на станциях, со всех сторон

оконтуривающих область азимутального, магистрального разрыва, показывает, что магистральное разрывообразование представляет собой гипоцентр, одновременно билатерально распространяющийся одноосный процесс. Сложные волновые картины регистраций цифровых записей, как на близрасположенных турецких сейсмических станциях, так и на удаленной геофизической станции Гарни ($\Delta = 740\text{ км}$) [Lekkas et al., 2023], показывают, что процесс разрывообразования по своему характеру, представляет собой, нелинейный, многоактовый процесс, состоящий из четырех субочагов.

Детали вспарывания магистрального разрыва и характер трещинообразования в очаговой зоне определяют особенности этих субисточников. Для их выявления были применены широко используемые в современной сейсмологии методы спектрального анализа очагового излучения объемных волн, зарегистрированные на сейсмостанциях. Какой бы сложности не были очаговые процессы и излучения, они описываются с помощью спектральной модели ω^2 [Аки, Ричардс, 1983] с двумя угловыми частотами разлагающими очаговое излучение на регулярные низкочастотные и высокочастотные составляющие. Этот сложный процесс магистрального разрывообразования наилучшим образом аппроксимируется спектральной моделью Хаскела [Аверьянова, 1989]. Для получения количественных значений референтные частот f_0 , f_1 и промежуточный диапазон доминантных частот, приведенных на спектрах записей на турецких станциях, нами были представлены в билогарифмическом масштабе в виде двух прямых, позволяющих получить значение первой референц-частоты $f_0 = 1,25$ Гц. С целью выделения второй f_1 референц частоты, частотного диапазона низкочастотных доминантных составляющих очагового излучения, был проведен спектральный анализ волновых форм амплитудно-частотных спектров продольных Р-волн, зарегистрированных на удаленной геофизической станции «Гарни», позволивший выделить вторую референц-частоту $f_1 = 0,55$ Гц. По практически квазигоризонтальному амплитудному уровню спектра доминантной низкочастотной составляющей прямым способом было определено значение скалярного сейсмического момента $M_0 = 5,2 \cdot 10^{20}$ Н·м. На этой же близгоризонтальной прямой низкочастотной составляющей четко выделяются три пика высокочастотных наложений, которые соответствуют очаговому излучению субисточника этого магистрального разрыва. По экспериментально определенным исходным данным, используя приведенные в работах [Костров, 1975; Аверьянова, 1989; Аптекман и др., 1989] формулы, были рассчитаны основные динамические параметры очага, количественные значения которых представлены в таблице 1.

Согласно этой модели, гипоцентр очага, где было накоплено наибольшее значение сейсмотектонических напряжений $\sigma = 2,5 \div 3,5$ мБар, и от которого начался процесс формирования магистрального разрывообразования, приурочен к Позарчикскому сегменту, к системе трансформного Восточно-Анатолийского разлома. Азимут магистрального разрыва совпадает с азимутом системы ступенчатых кулисообразно расположенных геолого-тектонических разрывных нарушений.

На основе кинематических, динамических параметров и спектральных характеристик очагового излучения, была разработана геодинамическая модель очага этого сильнейшего землетрясения Турции (рис. 4).

Таблица 1 / Table 1

Кинематические и динамические параметры разрывообразования очага Mw =7,8
Газиантепского землетрясения /
Kinematic and dynamic parameters of the rupture formation of the Gaziantep earthquake
Mw =7.8

Кинематические параметры / Kinematic parameters			Динамические параметры / Dynamic parameters						
Φ_S - азимутальная ориентация разрывообразования ($^{\circ}$)	$\Delta\tau$ - длительность разрывообразования (сек)	скорость разрывообразования (км·сек ⁻¹)	L - длина магистрального разрыва (км)	M_0 - скалярный сейсмический момент (Н·м)	E_S - высвобожденная сейсмическая энергия (Дж)	$\Delta\sigma$ - сброшенное напряжение (мБар)	$\Delta\tau$ - сброшенное касательное напряжение (мБар)	S - площадь поверхности разрыва очага (км ²)	u - сейсмическая подвижка (м)
Φ_S - azimuthal orientation of rupture formation ($^{\circ}$)	$\Delta\tau$ - duration of rupture formation (sec)	speed of rupture formation (km·sec ⁻¹)	L - length of main rupture (km)	M_0 - scalar seismic moment (N·m)	E_S - released seismic energy (J)	$\Delta\sigma$ - released voltage (mBar)	$\Delta\tau$ - released shear stress (mBar)	S - surface area of hypocenter rupture (km ²)	u - eismotectonic movement (m)
228	37,8	2,4	140	$5,4 \cdot 10^{20}$	$3,16 \cdot 10^{16}$	2,5	3,5	5600	3,2

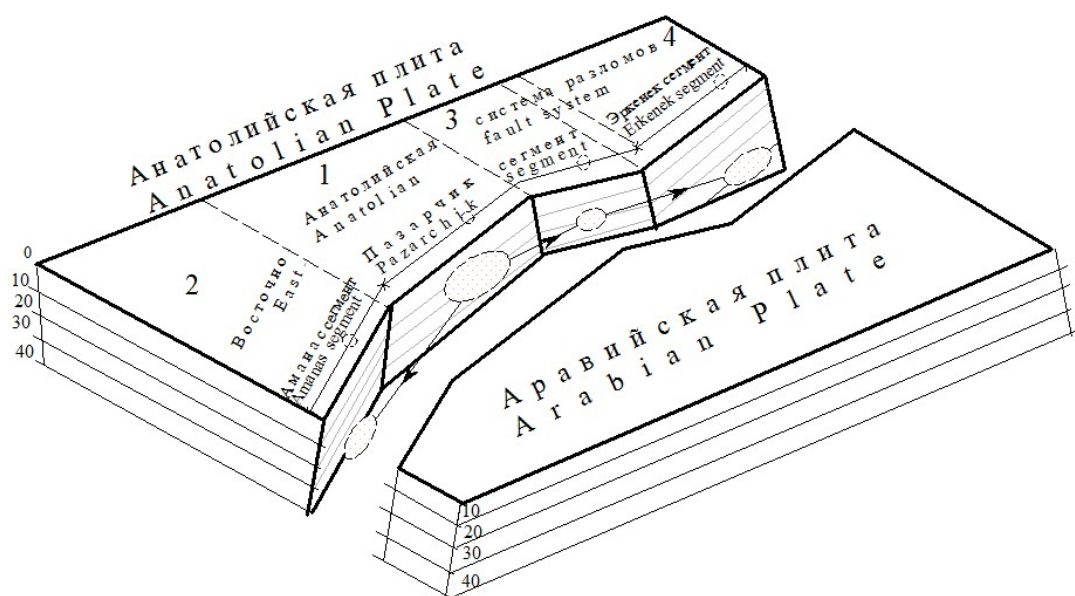


Рис. 4. Геодинамическая модель очага Газиантепского землетрясения

Fig. 4. Geodynamic model of the focus of the Gaziantep earthquake

Результаты и их обсуждение

Анализ параметров фокальных механизмов землетрясений от 06 февраля 2023 года с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.5$, короткий интервал разделяющего их времени и пространственная близость их возникновения, а также наличие непревышения разности значений магнитуд $\Delta m \leq 0.4$, по всей вероятности указывают на то, что эти землетрясения являются, т.н. «дуплет»-землетрясениями [Davison, 1972; Викулин и др., 2008; Cheng-Horng et al., 2008]. Резкое изменение накопленных тектонических напряжений в очагах этих землетрясений послужило триггерным механизмом для инициирования возникновения третьего землетрясения от 20 февраля 2023 года с магнитудой $M_w = 6.3$. Детальное изучение этих процессов позволит выявить основные закономерности и характерные особенности разрывообразований, возникающих в районе очагов сильных землетрясений.

Приведенные инструментальные данные в информативных бюллетенях ведущих мировых сейсмологических агентств, а также возникновение более 8 000 афтершоков, указывают на сложный характер процессов разрывообразования в очагах этих землетрясений.

Эффективная длина магистрального разрыва направлена с юго-запада на северо-восток и последовательно полностью охватывает Аманосский, Пазарчикский и Эргенекский сегменты до дизъюнктивного узла этой системы с Сургутского глубинного разлома [Lekkas et al., 2023]. В ходе развития разрывообразования происходит относительно гладкое скольжение без отрыва берегов этих разрывных сегментов с одновременным раздроблением сплошности геологической среды на перемычках кулисообразно расположенных сегментов. В общем процессе разрывообразования эти фрагменты раздробления геологической среды представляют собой субочаги мультиплетного, многоактового вспарывания магистрального разрыва. При возникновении землетрясения в гипоцентральной области произошло резкое относительное смещение противоположенных бортов магистрального разрыва, значение которого составило $u = 3,2$ м. Значительная по величине сейсмотектоническая подвижка по мере удаления от гипоцентра убывает. На основе тензорного анализа сейсмического момента, были определены главные диагональные составляющие M_1 , M_2 , M_3 и по этим данным рассчитан коэффициент Лодэ-Надаи $\mu = 0,08$, который указывает на то, что в очаге подвижка по разрыву представляет собой чистый левосторонний сдвиг.

В дальнейшем геодинамическая модель может быть уточнена с помощью привлечения пространственно-временного распределения афтершокового процесса данного землетрясения.

Построенная геодинамическая модель позволит выявить основные закономерности и характерные особенности разрывообразования в очагах, возникающих в регионе сильных землетрясений, и позволит адекватно оценить уточненную картину сейсмогенеза.

Выводы

Анализ параметров фокальных механизмов землетрясений от 06 февраля 2023 года с $M_w = 7.8$ и $M_w = 7.5$, короткий интервал разделяющего их времени и пространственная близость их возникновения, а также наличие непревышения разности значений магнитуд $\Delta m \leq 0,4$, по всей вероятности указывают, что эти землетрясения являются, т.н. «дуплет»-землетрясениями. Резкое изменение накопленных тектонических напряжений в очагах этих землетрясений послужило триггерным

механизмом для инициирования возникновения третьего землетрясения 20 февраля 2023 года с $M_w = 6.3$.

На основе определения кинематических, динамических параметров и спектральных характеристик очагового излучения разработана геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения в Турции от 06 февраля 2023 года с магнитудой $M_w = 7.8$.

При возникновении землетрясения в гипоцентральной области произошло резкое относительное смещение противоположенных бортов магистрального разрыва, значение которого составило $u = 3,2$ м. Значительная по величине сейсмотектоническая подвижка по мере удаления от гипоцентра убывает.

На основе тензорного анализа сейсмического момента, определены главные диагональные составляющие M_1 , M_2 , M_3 и по этим данным рассчитан коэффициент Лоде-Надаи $\mu = 0,08$, значение которого показывает, что в очаге подвижка по разрыву представляет собой чистый левосторонний сдвиг.

Геодинамическая модель в будущем может быть уточнена с помощью привлечения пространственно-временного распределения афтершокового процесса землетрясения.

Литература

1. Аверьянова В.Н. Энергетический спектральный метод оценки сейсмической опасности. М.: Наука, – 1989. – 187 с.
2. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Т. 1, 2, М.: Изд-во «Мир», – 1983.
3. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Полиарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очагов. // Вулканология и сейсмология. – 1989. – С. 66–79.
4. Викулин А.В., Викулина С.А., Водинчар Г.М. Землетрясения-дуплеты и пары землетрясений – закономерность сейсмического процесса. // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РА. – 2008. – С. 145–149.
5. Габриелян А.А., Саркисян О.А., Симонян Г.П. Сейсмотектоника Армянской ССР. Изд-во Ереван, ун-та. – 1981. – 284 с.
6. Габриелянц Г.А., Клешев К.А., Шеин В.С. Возможно нефтегазоносные бассейны Армении и их углеводородных потенциал. // Геология нефти и газа. – 2002. – №1. – С. 21–30.
7. Гиоргобиани Т. В. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 1. С. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063.
8. Гиоргобиани Т.В., Закарая Д.П. Этапы, механизмы и геодинамика формирования складчатой системы Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10. № 2. С. 22–37. DOI:10.46698/VNC.2020.58.70.002.
9. Караханян А.С. Активные разломы и сильные землетрясения Анатолийско-Малокавказского орогена. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. – М.:1995. – 45 с.
10. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука. 1975. – 176 с.
11. Ризниченко Ю.В. Избранные труды. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука. 1985. – 405 с.
12. Шебалин П.Н. Увеличение радиуса корреляции и цепочки землетрясений перед сильнейшими сейсмическими событиями. // Физика земли. – 2020. – №1 – С. 30–42.

DOI:10.31857/S0002333720010135.

13. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., and Geodakyan E. Tectonic Activities Description in the Ongoing Collision Zone of the Eurasia-Arabia Plates Using 2D Surface Waves Tomography. *Russian Journal of Earth Sciences*. – 2023. – Vol. 23. – ES2004. – DOI: 10.2205/2023ES000835.

14. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Phys. Rev. A*. – 1988. – Vol. 38. pp. 364–374.

15. Berberian M. Master ‘blind’ thrust faultshidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. // *Tectonophysics*. – 1995. – 241. pp. 193–224.

16. Brinkman R. *Geology of Turkey*. Ferdinand Enkever bay, Stuttgart, – 1976.

17. Cheng-Horng Lin, Yih-Hsiung Yeh, Masataka Ando, Kuang-Jung Chen, Tao-Ming Chang, and Hsin-Chieh Pu Earthquake Doublet Sequences: Evidence of Static Triggering in the Strong Convergent Zones of Taiwan. // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* – 2008. – Vol. 19. No. 6. – pp. 589–594.

18. Davison Charles Twin Earthquakes. *The Journal of Geology*. – 1972. – Vol. 35. No. 6. – pp. 507–526.

19. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kengerli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., and Soloviev A. Geodynamics, seismicity and seismic hazards of the Caucasus. // *Earth Sci. Rev.* – 2020. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.

20. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., and Matevosyan G. Study of modern regional and local anomal variations of seismicity in the Tavro-Caucasian region. // *EGU General Assembly*. – 2023. – Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-16905. DOI:10.5194/egusphere-egu23-16905.

21. Lekkas E., Carydis P., Vassilakis E., Mavroulis S., Argyropoulos I., Sarantopoulou A., Mavrouli M., Konsolaki A., Gogou M., Katsetsiadou K.-N., Kotsi E., Spyrou N.-I., Diakakis M., Kranis H., Skourtsos E., Lozios S., Soukis K. The 6 February 2023 Turkey-Syria Earthquakes. *Newsletter of Environmental, Disaster and Crises Management Strategies*. // 2023. – Vol. 29. ISSN 2653–9454. DOI: 10.13140/RG.2.2.17643.82726.

22. McKenzie Dan Active tectonics of the Mediterranean region. // *Geophys. J.R. aster. Soc.* – 1972. – Vol. 30. – pp. 109–185.

23. Reilinger R., McClusky S., Vernant Ph., and all. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Ebrasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of geophysical research*. – 2006. – Vol. 111. – B05411. DOI:10.1029/2005JB004051.

References

1. Averyanova V.N. *Energetic Spectral Method of Assessment of Seismic Hazard*. Moscow. Nauka. 1989. 187 p. (In Russ.)

2. Aki K., Richards P. *Quantitative Seismology*. Vol. 1, 2. Moscow. Publishing house «Mir». 1983. (In Russ.)

3. Aptekman Zh.Ya., Balavina Yu.Ph., Zakharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., Poliarpova L.A., Chepkunas L.S. Spectra of P-waves in the Problem of Determining the Dynamic Parameters of Earthquake Sources. Transition from the Station Spectrum to the Focal Zone Spectrum and Estimation of the Dynamic Parameters of the Sources. *Volcanology and Seismology*. 1989. pp. 66–79. (In Russ.)

4. Vikulin A.V., Vikulina S.A., Vodinchar G.M. Doublet Earthquakes and Earthquake Pairs – a Pattern of the Seismic Process. *Geophysical Monitoring and Problems of Seismic Safety of the Russian Far East*. Petropavlovsk-Kamchatsky: KF GS RA. 2008. pp. 145–149. (In Russ.)

5. Gabrielyan A.A., Sargsyan O.A., Simonyan G.P. *Seismotectonics of the Armenian SSR*. Publishing house Yerevan, univ. 1981. 284 p. (In Russ.)

6. Gabrielyants G.A., Kleshev K.A., Shein V.S. The Possible Oil and Gas Basins of Armenia and their Hydrocarbon Potential. *Geology of oil and gas*. 2002. No. 1. pp. 21–30. (In Russ.)
7. Giorgobiani T.V., Zakaraia D.P. Folding Structure of the South Slope of the Great Caucasus in Crossing the Gorge of the River Ksani. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 2. pp. 22–37. DOI: 10.46698/VNC.2020.58.70.002.
8. Giorgobiani T.V. Stages, Mechanism and Geodynamics of Formation of the Folded System of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2020. Vol. 10. No. 1. pp. 35–42. DOI: 10.23671/VNC.2020.1.59063.
9. Karakhanyan A.S. Active Faults and Strong Earthquakes of the Anatolian-Lesser Caucasian Orogeny. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow. 1995. 45 p. (In Russ.)
10. Kostrov B.V. Mechanics of a Tectonic Earthquake Focal Zone. Moscow. Nauka. 1975. 176 p. (In Russ.)
11. Riznichenko Yu.V. Selected Papers. Problems of Seismology. Moscow. Nauka. 1985. 405 p. (In Russ.)
12. Shebalin P.N. Increase in the Correlation Radius and the Chain of Earthquakes before the Strongest Seismic Events. *Physics of the Earth*. 2020. No. 1. pp. 30–42. DOI:10.31857/S0002333720010135. (In Russ.)
13. Abrehdari S.H., Karapetyan J.K., Rahimi H., and Geodakyan E. Tectonic Activities Description in the Ongoing Collision Zone of the Eurasia-Arabia Plates Using 2D Surface Waves Tomography. *Russian Journal of Earth Sciences*. 2023. Vol. 23. ES2004. DOI: 10.2205/2023ES000835.
14. Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. Self-organized criticality. *Phys. Rev. A*. 1988. Vol. 38. pp. 364–374.
15. Berberian M. Master ‘blind’ thrust faultshidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*. 1995. 241. pp. 193–224.
16. Brinkman R. *Geology of Turkey*. Ferdinand Enkever bay, Stuttgart, 1976.
17. Cheng-Horng Lin, Yih-Hsiung Yeh, Masataka Ando, Kuang-Jung Chen, Tao-Ming Chang, and Hsin-Chieh Pu Earthquake Doublet Sequences: Evidence of Static Triggering in the Strong Convergent Zones of Taiwan. *Terr. Atmos. Ocean. Sci*. 2008. Vol. 19. No. 6. pp. 589–594.
18. Davison Charles Twin Earthquakes. *The Journal of Geology*. 1972. Vol. 35. No. 6. pp. 507–526.
19. Ismail-Zadeh A., Adamia S., Chabukiani A., Chelidze T., Cloetingh S., Floyd M., Gorshkov A., Gvishiani A., Ismail-Zadeh T., Kaban M.K., Kadirov F., Karapetyan J., Kengerli T., Kiria J., Koulakov I., Mosar J., Mumladze T., Müller B., Sadradze N., Safarov R., Schilling F., and Soloviev A. Geodynamics, seismicity and seismic hazards of the Caucasus. *Earth Sci. Rev*. 2020. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103222.
20. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., and Matevosyan G. Study of modern regional and local anomal variations of seismicity in the Tavro-Caucasian region. EGU General Assembly. 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023. EGU23–16905. DOI:10.5194/egusphere-egu23-16905.
21. Lekkas E., Carydis P., Vassilakis E., Mavroulis S., Argyropoulos I., Sarantopoulou A., Mavrouli M., Konsolaki A., Gogou M., Katsetsiadou K.-N., Kotsi E., Spyrou N.-I., Diakakis M., Kranis H., Skourtsos E., Lozios S., Soukis K. The 6 February 2023 Turkey-Syria Earthquakes. *Newsletter of Environmental. Disaster and Crises Management Strategies*. 2023. Vol. 29. ISSN 2653–9454. DOI: 10.13140/RG.2.2.17643.82726.
22. McKenzie Dan Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J.R. aster. Soc*. 1972. Vol. 30. pp. 109–185.
23. Reilinger R., McClusky S., Vernant Ph., and all. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Ebrasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of geophysical research*. 2006. Vol. 111. B05411. DOI:10.1029/2005JB004051.