

УДК 550.348.4

DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002

Оригинальная статья

Сейсмологические индикаторы геодинамических обстановок формирования землетрясений на территории Турции в 2023 году

Ю.М. Вольфман , Е.Я. Колесникова

Институт сейсмологии и геодинамики, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Россия, 295007, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4, e-mail: seism.volf@gmail.com

Статья поступила: 16.06.2023, доработана: 04.09.2023, принята к публикации: 11.09.23.2023

Резюме: Актуальность работы. Колоссальный масштаб бедствий, причиненных катастрофическими землетрясениями в Турции и Сирии 6 февраля 2023 года, и высокая сейсмическая активность в течение длительного времени вызвали обоснованные опасения у населения соседних регионов. Они касались возможности смещения области высокой сейсмичности на соседние территории и возникновения катастрофических землетрясений в их пределах. Эти факторы обусловили актуальность исследования данного сейсмического процесса, его основных толчков и многочисленных афтершоков. **Цель исследований.** Анализ пространственно-временного распределения сейсмичности, исследование изменений напряженно-деформированного состояния земной коры региона в период его высокой сейсмической активности, а также идентификация геодинамических обстановок сейсмогенеза. **Методы исследования.** Основу метода составил алгоритм пространственно-временного и кинематического анализа данных о фокальных механизмах землетрясений. **Результаты работы.** Количественное соотношение разных типов землетрясений, для которых получены фокальные механизмы (всего 130 очагов), показало, что большинство из них (47%, в том числе, катастрофические толчки 6 февраля) являются сдвиговыми. Их формирование равновероятно как в обстановках сжатия, так и при растяжении земной коры. В меньшей степени (38% очагов) проявились обстановки растяжения. И только 15% фокальных механизмов отвечают обстановкам сжатия земной коры региона. Установлены закономерности (сегментарный характер) в распределении ориентировок осей сжатия и растяжения сейсмогенерирующих полей напряжений. Показано, что в совокупности очагов, для которых идентифицированы кинематические обстановки их формирования (растяжение или сжатие земной коры), доминируют те, которые отражают влияние растягивающих напряжений на процессы сейсмогенеза. При этом ориентировки осей растяжения образуют контрастный максимум в направлении $295-310^{\circ}$. В тоже время оси сжатия образуют слабоконтрастные максимумы по многим направлениям. Это указывает на относительно стабильный характер обстановок растяжения земной коры и на высокую вариативность полей напряжений, предопределивших обстановки сжатия на исследуемой территории. В результате по комплексу признаков установлено, что в регионе доминировали обстановки растяжения земной коры в широтном и юго-восточном направлениях, обусловленные дивергентным характером взаимодействия Анатолийской субплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома.

Ключевые слова: землетрясения, фокальные механизмы, растяжение (сжатие) земной коры, кинематические обстановки, процессы дивергенции.

Для цитирования: Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я.. Сейсмологические индикаторы геодинамических обстановок формирования землетрясений на территории Турции в 2023 году. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(3): 19-32. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002.

DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002

Original paper

Seismological indicators of geodynamic conditions of earthquakes formation in Turkey in 2023

Yu.M. Volfman , E.Ya. Kolesnikova

Institute of Seismology and Geodynamics, V.I. Vernadsky Crimean Federal University,
4 V.I. Vernadsky Avenue, Simferopol, 295007, Russian Federation
e-mail: seism.volf@gmail.com

Received: 16.06.2023, revised: 04.09.2023, accepted: 11.09.2023

Abstract: Relevance. The colossal scale of the disasters caused by the catastrophic earthquakes in Turkey and Syria on February 6, 2023, and the high seismic activity for a long time caused reasonable concerns among the population of neighboring regions. They concerned the possibility of shifting the area of high seismicity to neighboring territories and the occurrence of catastrophic earthquakes within them. These factors determined the relevance of the study of this seismic process, its main aftershocks and numerous aftershocks. **Aim.** Analysis of the spatial-temporal distribution of seismicity, study of changes in the stress-strain state of the Earth's crust of the region during its high seismic activity, as well as identification of geodynamic conditions of seismogenesis. **Methods.** The method is based on the algorithm of spatial-temporal and kinematic analysis of data on focal mechanisms of earthquakes. **Results.** The quantitative ratio of different types of earthquakes for which focal mechanisms were obtained (130 foci in total) showed that most of them (47%, including the catastrophic tremors of February 6) are shear. Their formation is equally likely both in conditions of compression and during stretching of the Earth's crust. To a lesser extent (38% of foci), stretching conditions were manifested. And only 15% of the focal mechanisms correspond to the conditions of compression of the earth's crust of the region. Regularities (segmental character) in the distribution of orientations of compression and stretching axes of seismogenerating stress fields are established. It is shown that in the totality of foci for which the kinematic conditions of their formation (stretching or compression of the Earth's crust) are identified, those that reflect the influence of tensile stresses on the processes of seismogenesis dominate. In this case, the orientations of the stretching axes form a contrasting maximum in the direction of 295-310°. At the same time, the compression axes form low-contrast maxima in many directions. This indicates the relatively stable nature of the conditions of stretching of the Earth's crust and the high variability of the stress fields that predetermined the compression conditions in the study area. As a result, according to a set of features, it was found that the conditions of stretching of the Earth's crust in the latitudinal and south-easterly directions dominated in the region, due to the divergent nature of the interaction of the Anatolian subplate with the rest of Arabia along the zone of the East-Anatolian fault.

Keywords: earthquakes, focal mechanisms, stretching (compression) of the Earth's crust, kinematic situations, divergence processes.

For citation: Volfman Yu. M., Kolesnikova E. Ya. Seismological indicators of geodynamic conditions of earthquakes formation in Turkey in 2023. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2023. 13(3): 19-32. DOI: 10.46698/VNC.2023.84.80.002.

Введение

Начало 2023 г. ознаменовалось катастрофическими землетрясениями в пределах Турции и пограничных с ней районов Сирии. В течение 6 февраля здесь произошло два землетрясения с магнитудами $M=7.75$ и $M=7.55$, приведших к многочисленным человеческим жертвам и колоссальным разрушениям. Очаг первого, наиболее раз-

рушительного из этих них, с координатами $\varphi=37.23^\circ$, $\lambda=37.019^\circ$, располагался на относительно небольшой глубине ($h=17.5$ км) в пределах густонаселенного региона, что многократно усилило катастрофический эффект его воздействий. Через 9 часов произошло второе сильное землетрясение ($\varphi=38.008^\circ$, $\lambda=37.211^\circ$, $M=7.55$, $h=13.5$ км), которое привело к новым жертвам, «довершило» разрушение инфраструктуры региона и усложнило проведение спасательных работ.

Исходные данные и методы исследования

Исходными данными исследований послужили выборки из сейсмических каталогов, размещенных на сайтах Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (<http://www.emsc-csem.org>) и Global CMT Web Page (<https://www.globalcmt.org>). По первому из них отслеживались все события в регионе с $M \geq 2$: так, с 6 февраля до 31 марта, когда сейсмическая активность исследуемого региона сохранялась на весьма высоком уровне, здесь было зарегистрировано 6535 землетрясений. Данные из второго каталога составили выборку землетрясений с $M \geq 4$ и выше, для которых получены фокальные механизмы землетрясений. За период с февраля по май идентифицировано 130 таких событий. Параметры наиболее значимых из них (с магнитудами $M \approx 5$ и выше), на которые в работе есть прямые указания, приведены в таблице.

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры наиболее сильных землетрясений, произошедших на территории Турции и Сирии в феврале-мае 2023 года /
The main parameters of the strongest earthquakes that occurred on the territory of Turkey and Syria in February-May 2023

№ п/п	Дата / Data	Координаты очага / Source coordinates		h , км	M	Параметры осей главных напряжений (азимут/угол) / Parameterers of the axes (azimuth / angle)			Кин. обст. / Kin. sit/
		$\varphi^\circ\text{N}$	$\lambda^\circ\text{E}$			P	N	T	
1	06.02.2023	37,23	37,019	17.5	7,75	183/01	15/88	273/0	СДВ
2	06.02.2023	38,008	37,211	13.5	7,55	232/06	351/77	141/11	СДВ
3	06.02.2023	38,19	38,176	8.0	5,38	16/06	146/80	285/07	СДВ
4	06.02.2023	38,001	36,508	9.0	4,97	208/44	40/46	304/06	Рст
5	06.02.2023	37,978	36,446	11.5	5,23	161/76	12/12	281/07	Рст
6	06.02.2023	37,259	37,102	11.5	5,30	326/72	177/16	85/09	Рст
7	07.02.2023	37,764	37,731	19.5	5,48	159/13	268/54	61/32	СЖТ
8	07.02.2023	38,097	38,64	11.5	5,36	187/12	83/48	287/40	СЖТ
9	07.02.2023	37,994	36,477	9.5	4,96	275/74	30/07	122/14	Рст
10	07.02.2023	37,969	36,604	19.5	5,31	57/61	175/15	272/24	Рст
11	08.02.2023	38,006	36,496	21.5	5,02	218/48	29/41	123/05	Рст
12	08.02.2023	37,937	37,661	10.0	5,36	70/12	210/75	338/09	СДВ
13	12.02.2023	38,824	38,031	13.5	4,99	181/15	57/64	276/20	СДВ

14	16.02.2023	36,177	35,797	13.5	5,17	293/67	189/06	97/22	Рст
15	20.02.2023	36,159	36,034	11.5	6,34	195/43	356/45	96/10	Рст
16	23.02.2023	36,059	36,095	11.5	4,94	38/60	193/27	289/11	Рст
17	27.02.2023	38,217	38,256	11.5	5,24	217/16	104/54	317/31	Сжт
18	03.03.2023	37,84	36,7	11.5	4,99	352/60	218/21	120/19	Рст
19	21.05.2023	37,923	36,253	8,0	4,91	210/60	44/29	311/06	Рст

Примечания. Кинематические обстановки формирования очага (столбец Кин. обст.): Рст – растяжения, Сжт – сжатия, Сдв – равновероятные как в обстановках сжатия, так и в условиях растяжения (сдвиговые).

Идентификация кинематических обстановок в очагах выполнена в соответствии с классификацией деформационных режимов [Гущенко и др., 1991; Гинтов, 2005], в основу которой заложены соотношения углов наклона осей главных напряжений. Так, обстановкам растяжения геологической среды отвечают сбросовый, сдвиго-сбросовый и сбросо-сдвиговый деформационные режимы; обстановкам сжатия – взбросовый, сдвиго-взбросовый и взбросо-сдвиговый режимы [Ребецкий и др., 2017]. Формирование сдвиговых очагов равновероятно как в обстановках сжатия, так и в условиях растяжения.

Результаты работы и их обсуждение

Общая характеристика активной фазы сейсмического процесса. Главной причиной высокой сейсмичности на территории Турции является тектоническое взаимодействие Евразийской и Аравийской литосферных плит и их микроплит [Журавлев, Лукк, 2011; Ружич и др., 2023; Сулиди-Кондратьев, Козлов, 1980; Alptekin et al., 1986; Elliott et al., 2013; Golonka, 2004; Jackson et al., 1995; Nikishin et al., 2011; Okay, Nikishin, 2015 и др.], которое, по мнению исследователей, имеет коллизионную природу. За исключением высокосейсмичной области на западе Турции (на побережье Эгейского моря), основные сейсмогенерирующие зоны региона приурочены к крупным линейно-вытянутым геоструктурам, по которым либо происходит сочленение Евразийской и Аравийской плит (системы разломов Северо-Анатолийская и Загрос), либо проходит граница Анатолийской микроплиты с основной частью Аравии – вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома (рис. 1).

Следует отметить особенности сейсмического процесса, начавшегося землетрясениями 6 февраля: 1) катастрофические события не предварялись сколько-нибудь значительными форшоками в пределах территории; 2) очаги основных землетрясений и многочисленных афтершоков, локализованы, главным образом, вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома северо-восточного простирания и в непосредственной близости от него, образуя ответвление в широтном направлении; 3) расположенная неподалеку зона Северо-Анатолийского разлома все это время оставалась незадействованной в сейсмическом процессе, «откликнувшись» лишь несколькими событиями с $M=2-4$, вопреки тому, что Северо-Анатолийский разлом, трассирующий зону палеосубдукции, возникшую в результате сближения Евразии, Аравии и Африки [Stampfli, 2000; Wortel et al., 2000; Nikishin et al., 2011; Okay, Nikishin, 2015 и др.], обычно весьма активен в сейсмическом отношении.

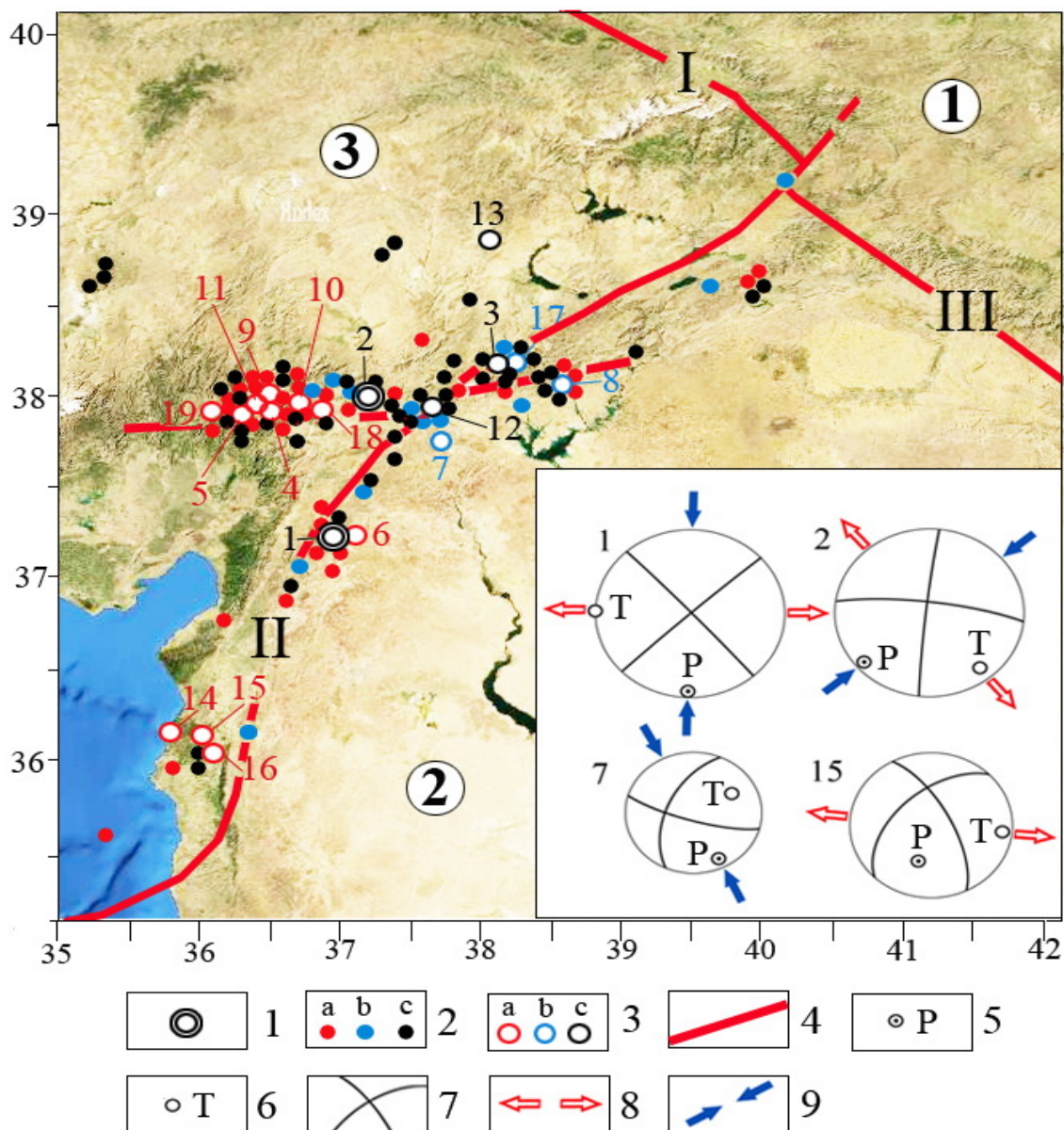


Рис. 1. Схема очагов землетрясений, для которых получены фокальные механизмы. Условные обозначения. На схеме: 1 – эпицентры катастрофических землетрясений с $M > 7$; 2-3 – очаги с $M < 4,9$ (2) и с $M > 4,9$ (3), для которых получены фокальные механизмы, сформировавшиеся в обстановках растяжения (a), сжатия (b), и сдвиговые очаги, равновероятные в условиях и растяжения, и сжатия земной коры (c); 4 – основные сейсмогенерирующие зоны региона (I, II – зоны Северо-Анатолийского и Восточно-Анатолийского разломов соответственно, III – система Загрос). На врезке – фокальные механизмы наиболее сильных землетрясений разных типов и их номера в таблице: 5 – оси сжатия; 6 – оси растяжения; 7 – проекции нодальных плоскостей; 8-9 – направления растяжения (8) или сжатия (9) в очаге. Цифры в кружках – Евразийская (1) и Аравийская (2) плиты; Анатолийская микроплита (3) /

Fig. 1. The scheme of localization of earthquake foci for which focal mechanisms are obtained.. Symbols. In the diagram: 1 – epicenters of catastrophic earthquakes with $M > 7$; 2-3 – focal mechanisms with $M < 4.9$ (2) and with $M > 4.9$ (3), for which focal mechanisms formed in conditions of stretching (a), compression (b), and shear foci, equally probable in conditions of stretching and, and compression of the earth's crust (c); 4 – the main seismogenerating zones of the region (I, II – zones of the North Anatolian and East Anatolian faults, respectively, III – the Zagros system). The inset shows the focal mechanisms of the strongest earthquakes of different types and their numbers in the table: 5 – compression axes; 6 – stretching axes; 7 – projections of nodal planes; 8-9 – directions of stretching (8) or compression (9) in the focus. The numbers in the circles are Eurasian (1) and Arabian (2) plates; Anatolian microplate (3) /

Общий характер сейсмического процесса иллюстрирует хронограмма (рис. 2), отражающая посуточную последовательность проявлений сейсмогенеза. Графики показывают, что ежедневно в регионе в среднем происходило более 100 сейсмических толчков с $M \geq 2$ (график n, правая шкала). На этом фоне выделяются периоды повышенной сейсмической активности (так, с 6 по 12 февраля ежедневно регистрировалось до 230-и событий, 3 и 6-7 марта количество толчков в сутки превышало 150, а 15 марта произошло 202 землетрясения). Даже в периоды относительного сейсмического затишья их количество было достаточно большим – не менее 70 землетрясений в сутки; при этом некоторые из них (например, с 23 февраля по 1 марта) имели довольно высокие ($M \geq 4$) магнитуды, позволяющие идентифицировать кинематические обстановки в очагах в момент их формирования.

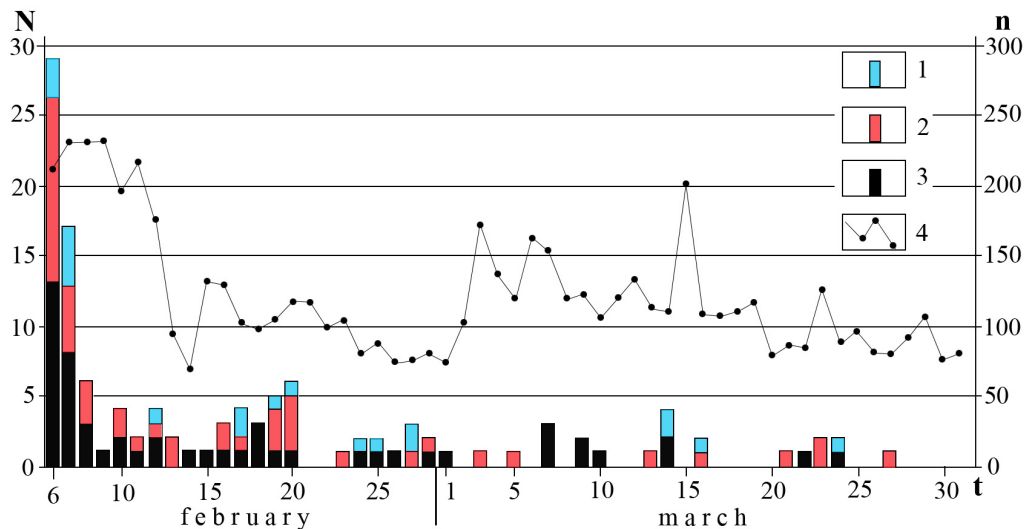


Рис. 2. Количественные соотношения разных типов землетрясений, для которых идентифицированы кинематические обстановки в очаге (N), и общее количество событий в регионе (n), произошедших в течение февраля-марта 2023 года. Условные обозначения: 1-3 – очаги, сформированные в обстановках сжатия (1), растяжения (2) и сдвиговые очаги, возникновение которых равновероятно как в условиях сжатия, так и при растяжении (3); 4 – график распределения общего количества землетрясений с $M \geq 2$ /

Fig. 2. Quantitative ratios of different types of earthquakes for which kinematic conditions in the focus (N) have been identified, and the total number of events in the region (n) that occurred during February-March 2023. Symbols: 1-3 – foci formed in conditions of compression (1), stretching (2) and shear foci, the occurrence of which is equally likely both under compression and under tension (3); 4 – a graph of the distribution of the total number of earthquakes with $M \geq 2$

В геодинамическом аспекте особый интерес представляет соотношение разных типов землетрясений, для которых идентифицированы кинематические обстановки в очаге (гистограмма, левая шкала N на рис. 2). Так, из 130 очагов, для которых получены фокальные механизмы, основная часть – 47 % (в том числе, катастрофические события 6 февраля – №№1,2 в таблице) являются сдвиговыми, формирование которых равновероятно как в обстановках сжатия, так и при растяжении земной коры. Несколько в меньшей степени (38% очагов) проявились обстановки растяжения. И только 15% фокальных механизмов отвечают условиям сжатия земной коры региона. Подобное соотношение очагов, отражающих разные кинематические обстановки сейсмогенеза в пределах одного из сегментов коллизионного Средиземноморского пояса, явилось неожиданным. Логичным в данной ситуации было бы преобладание проявлений регионального сжатия по отношению к обстановкам растяжения.

Особенности распределения ориентировок осей главных напряжений в фокальных механизмах землетрясений как индикатор геодинамических обстановок региональной сейсмогенеза. При всем многообразии идентифицированных обстановок сейсмогенеза, в регионе вполне явно проявились закономерности в распределении ориентировок осей сжатия и растяжения в очагах разных типов (рис. 3, 4).

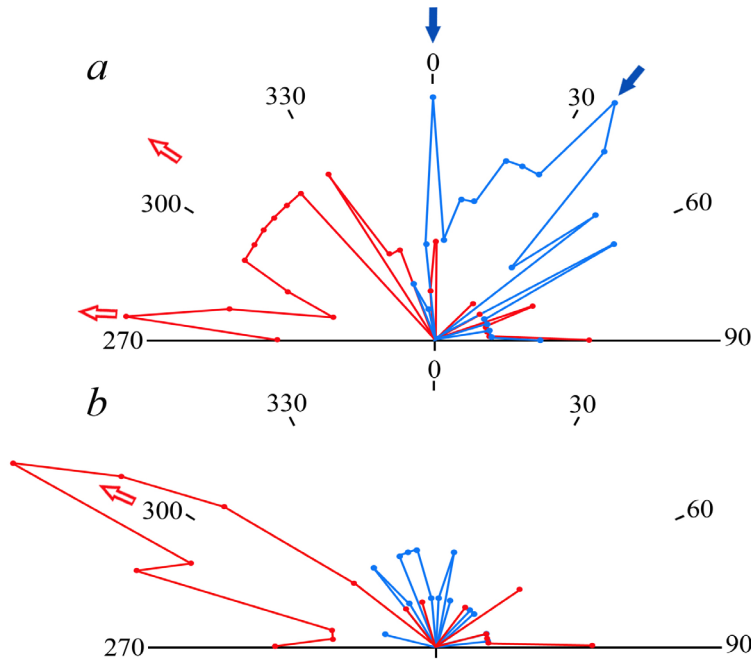


Рис. 3. Распределение ориентировок осей напряжений T (красное) и P (синее) в очагах сдвигового типа – 61 событие (а), в 49 очагах растяжения и в 19 очагах сжатия (б). Стрелками указаны направления регионального растяжения (красные) и сжатия (синие)/

Fig. 3. Distribution of orientations of the stress axes T (red) and P (blue) in the foci of the shear type – 61 events (a), in 49 foci of tension and in 19 foci of compression (b). The arrows indicate the directions of regional stretching (red) and compression (blue)

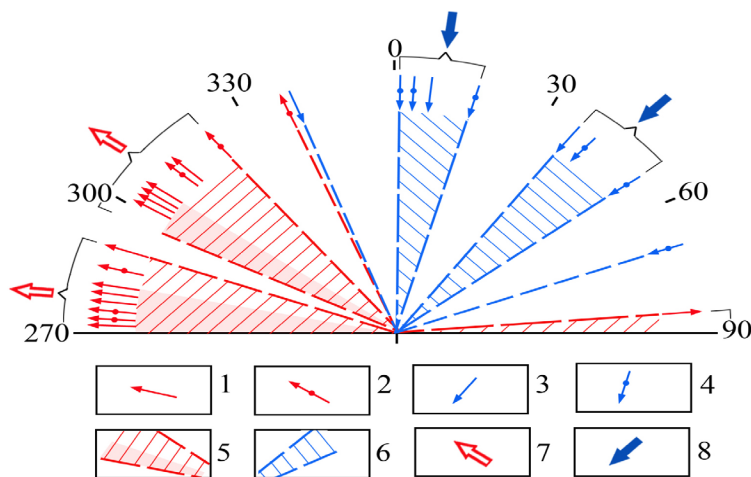


Рис. 4. Распределение ориентировок осей напряжений T и P в очагах землетрясений с $M > 4.9$. Условные обозначения: 1-2 – ориентировки осей T в очагах растяжения (1) и сдвиговых (2); 3-4 – ориентировки осей P в очагах сжатия (3) и сдвиговых (4); 5-6 – секторы концентрации осей растяжения (5) и сжатия (6); 7-8 – направления регионального растяжения (7) и сжатия (8) /

Fig. 4. Distribution of orientations of stress axes T and P in earthquake foci with $M > 4.9$. Symbols: 1-2 – orientations of the T axes in earthquake foci of tension (1) and shear (2); 3-4 – orientations of the P axes in earthquake foci of compression (3) and shear (4); 5-6 – sectors of the concentration of the axes of tension (5) and compression (6); 7-8 – directions of regional stretching (7) and compression (8)

Так, сопоставление ориентировок осей растяжения (T) и сжатия (P) в очагах *сдвигового типа* (61 событие), характеризует сегментарный характер их распределения (рис. 3а). Две пары максимумов ориентировок этих осей (в широтном и северо-западном направлениях для осей T , в меридиональном и северо-восточном направлениях – для осей P) отражают попеременное влияние 2-х систем сдвиговых напряжений на процессы сейсмогенеза – ортогональных (субмеридионального сжатия или субширотного растяжения) и диагональных (северо-восточного сжатия или северо-западного растяжения). В геодинамической трактовке, поскольку источником напряжений являются геоструктуры, расположенные к югу от исследуемой территории, правильнее будет считать, что диагональные обстановки обусловлены юго-восточным растяжением или юго-западным сжатием земной коры (далее будут указаны эти направления). В этих обстановках сформированы и катастрофические землетрясения 6 февраля 2023 г., соответственно, с $M=7.75$ и $M=7.55$ (№№1,2 в таблице; стереограммы 1, 2 на врезке к рис. 1).

На рисунке 3б совмещены розы-диаграммы ориентировок осей T и P в очагах, отражающих, соответственно, обстановки растяжения (49 очагов) и сжатия (19 очагов). Они построены не в относительном (в %), а в реальном масштабе, отражающем количество очагов каждого типа. Вследствие этого диаграмма выглядит «несбалансированной», но иллюстрирующей истинное соотношение проявлений разных типов сейсмогенеза. Можно констатировать следующее:

- в совокупности очагов, для которых идентифицированы кинематические обстановки их формирования (растяжение или сжатие земной коры), в количественном отношении доминируют те из них, которые отражают влияние растягивающих напряжений на процессы сейсмогенеза;

- высокая степень концентрации ориентировок осей растяжения, обусловившая их контрастный максимум в направлении $295-310^\circ$, с одной стороны, и слабоконтрастные максимумы с рассредоточением вдоль многих направлений осей сжатия, с другой стороны, указывают на стабильный характер обстановок растяжения земной коры и высокую вариативность напряжений, обусловивших обстановки сжатия на исследуемой территории.

Весомым аргументом в пользу данных положений является и характер распределения ориентировок осей сжатия и растяжения в очагах землетрясений с магнитудами $M>4.9$ (приведены в таблице). В этом случае тоже весьма уверенно выделяются две пары максимумов ориентировок главных осей, отражающих доминирующие кинематические обстановки в регионе: широтного растяжения–меридионального сжатия и юго-восточного растяжения–юго-западного сжатия (рис. 4). При этом высокие концентрации осей растяжения в интервалах $270-280^\circ$ и $300-305^\circ$ указывает на то, что именно процессы растяжения земной коры в этих направлениях играли основную роль в формировании сейсмогенеза.

Таким образом, с высокой степенью вероятности можно полагать, что преимущественно преобладающие в процессе регионального сейсмогенеза очаги сдвигового типа, возникновение которых равновероятно как в обстановках сжатия, так и в обстановках растяжения, в большинстве случаев обусловлены именно *обстановками растяжения земной коры* в широтном и юго-восточном направлениях. В геодинамической трактовке это означает, что современное взаимодействие Анатolianской микроплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолий-

ского разлома, где локализованы катастрофические землетрясения 6 февраля и их афтершоки, определяется, главным образом, не коллизионными, а дивергентными процессами, то есть растяжением земной коры в широтном и юго-восточном направлениях.

Хронологическая последовательность изменения кинематических обстановок сейсмогенеза. Анализ изменения во времени кинематических обстановок как в очагах всех 130-и землетрясений, для которых получены фокальные механизмы, так и в случаях реализации сильных (с $M > 4.9$) землетрясений (рис. 5), показал высокую вариативность обстановок на всем протяжении сейсмического процесса. Изменения происходили в течение весьма коротких (порой исчисляемых всего несколькими часами) промежутков времени. Даже катастрофические землетрясения 6 февраля (№№1, 2 в таблице) отражают резкую перемену напряженно-деформированного состояния земной коры, поскольку ортогональная система напряжений сменилась диагональной (врезка на рис. 1; рис. 5). В течение этих же суток произошло несколько значимых (с $M \geq 5$) событий в обстановках субширотного и юго-восточного растяжения, которые через несколько часов (7 февраля) сменились очагами субмеридионального сжатия с последующим восстановлением изначальных условий в виде вариативных обстановок растяжения земной коры (рис. 5).

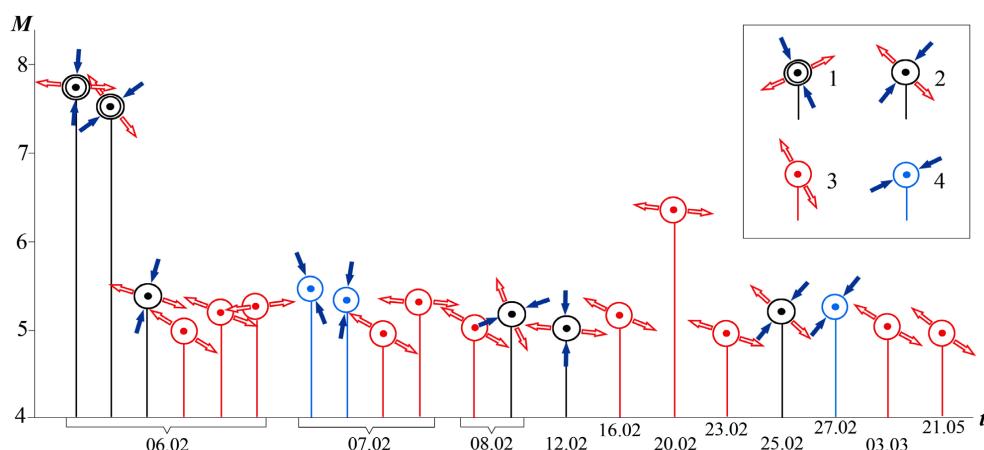


Рис. 5. Хронологическая последовательность изменения кинематических обстановок в очагах сильных (с $M > 4.9$) землетрясений. Условные обозначения: 1 – катастрофические сдвиговые землетрясения 6 февраля (№№1, 2 в таблице); 2 – сдвиговые очаги; 3-4 – очаги, сформировавшиеся в кинематических обстановках растяжения (3) и сжатия (4). Стрелки – направления растяжения (красные) и сжатия (синие) в очаге. M – шкала магнитуд, t – шкала времени /

Fig. 5. Chronological sequence of changes in kinematic settings in the foci of strong earthquakes (from $M > 4.9$). Symbols: 1 – catastrophic shear earthquakes on February 6 (No. 1, 2 in the table); 2 – shear foci; 3-4 – foci formed in kinematic conditions of stretching (3) and compression (4). Arrows – directions of stretching (red) and compression (blue) in the earthquake foci. M – is the magnitude scale, t – is the time scale

Кратковременная изменчивость кинематических обстановок сейсмогенеза для разных сейсмоактивных регионов ранее отмечалась и в наших работах [Вольфман и др., 2014; Volfman et al., 2017], и в публикациях других авторов [Гущенко, 1979; Етирмишли и др., 2019; Казымова, Казымов, 2020; Степаненко и др., 2013; Шибалин и до., 1986; Широкова, 1967; Юнга, 1996; Jackson, McKenzie, 1988; Tseng et al., 2016 и др.]. Установлено, что эти изменения, обусловившие многообразие проявлений деформационных режимов и кинематических обстановок в очагах землетрясений, отражают, как правило, не суммарное влияние различных геодинамических факторов в виде результирующего поля напряжений, а кратковремен-

ное преобладание воздействий какого-либо одного фактора над остальными. В некоторых случаях причиной разнообразия типов сейсмогенеза является локальное перераспределение полей напряжений на отдельных участках земной коры в процессе релаксации геологической среды после сильных землетрясений. Поэтому задачей сеймотектонических исследований является определение доминирующих обстановок в регионе, позволяющих установить характер геодинамического взаимодействия геоструктурных элементов тектоносферы, обусловивший общий ход сейсмического процесса.

Геодинамические сценарии развития региона и причины, обусловившие катастрофический характер турецких землетрясений. Результаты анализа изменения кинематических обстановок турецко-сирийских землетрясений 2023 года выявили основные особенности данного сейсмического процесса. Преобладающая часть очагов землетрясений (включая и очаги сдвигового типа) возникла в условиях растяжения земной коры, которые периодически (судя наличию очагов взбросового, сдвига-взбросового и взбросо-сдвигового типов, не менее 15-20-ти раз) сменялись обстановками регионального сжатия. Эта тенденция нашла отражение на хронограмме (рис. 5), из которой следует, что доминирующими обстановками, предопределившими характер большей части землетрясений с $M > 4.9$ и, соответственно, основные особенности геодинамики региона в период его высокой сейсмической активности, являются обстановки растяжения земной коры в широтном и юго-восточном направлениях. Это обстоятельство указывает на дивергентный характер взаимодействия Анатолийской микроплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома.

Системный характер распределения (в меридиональном и северо-восточном направлениях) ориентировок осей сжатия в очагах турецких землетрясений согласуется с доминирующими обстановками, установленными ранее при исследовании процессов сейсмогенеза этого же региона за период с 1977 по 2013 гг. [Volfman et al., 2017]. Было обосновано, что особенности геодинамики в этот период определялись периодически проявляющимися обстановками: а) меридионального сжатия, обусловленного движением Аравийской плиты на север; б) юго-западного–северо-восточного сжатия, вызванного процессами дивергенции в зоне Красноморского рифта, вследствие чего Аравия периодически «напирает» на Евразию в северо-восточном направлении.

Таким образом, можно обосновать геодинамический сценарий развития процессов сейсмогенеза в пределах исследуемой территории, который включает долговременную и кратковременную составляющие.

Первая отражает коллизионное взаимодействие сегментов тектоносферы 2-х типов: 1) периодическое сжатие земной коры в меридиональном направлении, обусловленное движением Аравийской плиты на север; 2) юго-западное–северо-восточное сжатие коры, вызванное процессами дивергенции в зоне Красноморского рифта и перемещением Аравии в северо-восточном направлении.

Вторая часть геодинамического сценария охватывает период высокой сейсмической активности региона (с февраля 2023 года), в течение которого доминировали обстановки растяжения земной коры в широтном и юго-восточном направлениях, обусловленные дивергентным характером взаимодействия Анатолийской микроплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома.

По-видимому, преодоление общего тренда развития региона могло реализоваться только путем инверсии геодинамического режима при условии приложения значительных по величине напряжений, что, в итоге, и обусловило катастрофический, «взрывной» всплеск сейсмической активности.

Выводы

Результаты анализа фокальных механизмов и пространственно-временного распределения очагов катастрофических турецко-сирийских землетрясений 6 февраля 2023 года и их афтершоков показали, что их формирование было обусловлено, главным образом, доминирующими геодинамическим обстановками растяжения земной коры в широтном и юго-восточном направлениях. Дивергентный характер кратковременного взаимодействия Анатолийской субплиты с остальной частью Аравии вдоль зоны Восточно-Анатолийского разлома и, соответственно, кинематические обстановки, предопределившие основные особенности сейсмогенеза, как бы «выпадают» из общего, долговременного тренда геодинамического развития региона, определяемого преимущественно коллизионными процессами в зоне сочленения литосферных плит Аравии и Евразии. Это инверсионное возмущение общего хода геодинамического развития региона, проявившееся относительно локально – только в пределах зоны внутриплитного Восточно-Анатолийского разлома, могло реализоваться лишь в условиях приложения весьма значительных по величине напряжений, что обусловило «взрывной», катастрофический по интенсивности всплеск сейсмической активности в регионе.

Литература

1. Вольфман Ю.М., Гинтов О.Б., Колесникова Е.Я., Муровская А.В. Тектонофизическая интерпретация механизмов очагов землетрясений системы Загрос // Геодинамика и тектонофизика. – 2014, 5(1). – С.305-319.
2. Гущенко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А. Структура поля современного регионального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса // Докл. АН СССР. – 1991. – 312. №4. – С. 830-835.
3. Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М.: Наука, 1979. – С. 26–51.
4. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. – Киев: Феникс, 2005. – 572 с.
5. Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э., Казымов И.Э. Расчет тензора сейсмического момента землетрясений Азербайджана за период 2012-2015 гг. // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. №7. – С. 103-115.
6. Журавлев В.И., Лукк А.А. Полуденная активизация сейсмичности в Тупции и ряде других регионов мира // Геофизические исследования. – 2011. – Том 12, № 4. – С.31-57.
7. Казымова С.Э., Казымов И.Э. Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений и GPS-станций. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. 10 (3). – С.40 – 56. DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003.
8. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. – М.: ГЕОС. – 2017. – 234 с.
9. Ружич В.В., Бержинская Л.П., Левина Е.А., Пономарева Е.И. О причинах возникновения и последствиях двух разрушительных землетрясений в Турции 06.02.2023 г. // Геология и окружающая среда. – 2023. – Т. 3, № 1. – С. 22-34.

10. Степаненко Н.Я., Симонова Н.А., Карданец В.Ю. Пространственные вариации осей главных напряжений в очагах землетрясений области Вранча. Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 г. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013. – С. 46–56.
11. Сулиди-Кондратьев Е.Д., Козлов В.В. Деструкция земной коры в зоне сочленения Африкано-Аравийского континента и Средиземноморско-складчатого пояса. // В кн.: Тектоника Средиземноморского пояса. / Отв. ред. Муратов М.В., Яншин А.Л. – М.: Наука, 1980. – С. 40-49
12. Шебалин Н.В., Ибрагимов Р.Н., Чернов Ю.К. и др. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.
13. Широкова Е.И. Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморско-Азиатского сейсмического пояса. // Физика Земли. – 1967. – №1. – С. 22–36.
14. Юнга С.Л. Сейсмоструктурные деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии. // Физика Земли. – 1996. – №12. – С. 37–58.
15. Alptekin O., Nabelek J., Toksoz M. Source mechanism of the Bartın earthquake of September 3, 1968 in northwest Turkey: evidence for active thrust faulting at the southern Black Sea margin // *Tectonophysics*. – 1986. – №122. – P. 73-78.
16. Elliott J., Copley A., Holley R., Scharer K., Parsons B. The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake // *J. Geophys. Res. Solid Earth*. – 2013. – Vol. 118. – pp. 1619-1637.
17. Golonka J. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic // *Tectonophysics*. – 2004. – 381. – P. 235-273.
18. Jackson J.A., Haines A.J., Hoot W.E. The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran // *Journ. Geophys. Res.* – 1995. – V. 100. – P. 15205-15219.
19. Jackson J.A., McKenzie D. The Relationship Between Plate Motions and Seismic Moment Tensors, and the Rates of Active Deformation in the Mediterranean and Middle-East // *Geophys. Journ.* – 1988. – Vol.93. – P. 45-73.
20. Nikishin A., Ziegler P., Bolotov S., Fokin P. Late Palaeozoic to Cenozoic Evolution of the Black Sea-Southern Eastern Europe Region: A View from the Russian Platform // *Turkish J. Earth Sc.* – 2011. – 20. – P. 571-634.
21. Okay A., Nikishin A. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region // *Int. Geol. Rev.* – 2015. – 57(5-8). – P. 1051-1076.
22. Stampfli G.M. Tethyan oceans // Bozkurt E., Winchester J.A., Piper, J.D.A. (eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area* – Geological Society, London: 2000. *Special Publications*. – 173. – P. 1-23.
23. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms // *Tectonophysics*. – 2016. – Vol. 691. – pp. 362–374.
24. Volfman Y.M., Kolesnikova E.Y., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective manifestation of tectogenic stress field within the Mediterranean belt (based on earthquake focal mechanism solutions). *Journal of Volcanology and Seismology*. 2017. Vol. 11. No. 6. pp. 447–461. DOI: 10.1134/S0742046317060069
25. Wortel M., Spakman W. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region // *Science*. – 2000. – 290. – P. 1910-1917.

References

1. Volfman Y.M., Gintov O.B., Kolesnikova E.Ya., Murovskaya A.V. 2014. Tectonophysical interpretation of earthquake focal mechanisms of the Zagros system. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (1), 305–319. DOI: 10.5800/GT-2014-5-1-0129. (In Russ.)
2. Gushchenko O.I., Mostryukov A.O., Petrov V.A. Structure of the field of modern regional stress in seismically active zones of the Earth's crust in the eastern part of the Mediterranean

active belt. Doklady of the Academy of Sciences of the USSR. 1991. 312. No. 4. pp. 830–835. (In Russ.)

3. Gushchenko O.I. Reconstruction of the field of megaregional tectonic stresses in seismically active regions of Eurasia. In: Fields of stress and deformation in the lithosphere. Moscow. Nauka, 1979. pp. 26–51. (In Russ.)

4. Gintov O.B. Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the Earth's crust of Ukraine. Kiev, Phoenix, 2005. 572 p. (In Russ.)

5. Yetirmishli G.J., Kazimova S.E., Kazimov I.E. Seismic-moment tensor of earthquakes in Azerbaijan for 2012–2015. Russian Geology and Geophysics. 2019. Vol. 60. No. 7. pp. 819–831. DOI: 10.15372/RGG2019053.

6. Zhuravlev V.I., Lukk A.A. Midday activation seismicity in Turkey and several other world regions. Geophysical Research. 2011. Vol. 12, No. 4. pp. 31–57. (In Russ.)

7. Kazimova S.E., Kazimov I.E. Geodynamics of the Talish region according to earthquake source mechanisms and GPS-stations. Geology and Geophysics of Russian South. 2020. Vol. 10. No. 3. pp.40–56. DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003. (In Russ.)

8. Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. From slip surfaces to tectonic stresses. Methods and algorithms. Moscow. GEOS. 2017. 234 p. (In Russ.)

9. Ruzhich V.V., Berzhinskaya L.P., Levina E.A., Ponomareva E.I. On the causes and consequences of two destructive earthquakes in Turkey on 06.02.2023. Geology and the Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. pp. 22–34. (In Russ.)

10. Stepanenko N.Ya., Simonova N.A., Kardanets V.Yu. Spatial variations of the axes of principal stresses in the sources of earthquakes in the Vrancea region. Seismological Bulletin of Ukraine for 2012 г. – Sevastopol: SPC “ECOSI-Hydrophysics”, 2013. – P. 46–56. (In Russ.)

11. Sulidi -Kondratyev E.D., Kozlov V.V. Destruction of the Earth's crust in the zone of junction of the African-Arabian continent and the Mediterranean-fold belt. In: Tectonics of the Mediterranean Belt. Moscow. Nauka, 1980. pp. 40–49. (In Russ.)

12. Shebalin N.V., Ibragimov R.N., Chernov Yu.K. et al. Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent, Fan, 1986. 368 p. (In Russ.)

13. Shirokova E.I. General patterns in the orientation of the main stresses in the sources of earthquakes in the Mediterranean-Asian seismic belt. Physics of the Solid Earth. 1967. No. 1. pp. 22–36. (In Russ.)

14. Yunga S.L. Seismotectonic deformations and stresses in fold belts of neotectonic activation in Northern Eurasia. Physics of the Solid Earth. 1996. No. 12. pp. 37–58. (In Russ.)

15. Alptekin O., Nabelek J., Toksoz M. Source mechanism of the Bartın earthquake of September 3, 1968 in northwest Turkey: evidence for active thrust faulting at the southern Black Sea margin. Tectonophysics. 1986. No. 122. pp. 73–78.

16. Elliott J., Copley A., Holley R., Scharer K., Parsons B. The 2011 Mw 7.1 Van (Eastern Turkey) earthquake. J. Geophys. Res. Solid Earth. 2013. Vol. 118. pp. 1619–1637.

17. Golonka J. Plate tectonic evolution of the southern margin of Eurasia in the Mesozoic and Cenozoic. Tectonophysics. 2004. 381. pp. 235–273.

18. Jackson J.A., Haines A.J., Hoot W.E. The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran. Journ. Geophys. Res. 1995. Vol. 100. pp. 15205–15219.

19. Jackson J.A., McKenzie D. The Relationship Between Plate Motions and Seismic Moment Tensors, and the Rates of Active Deformation in the Mediterranean and Middle-East. Geophys. Journ. 1988. Vol.93. pp. 45–73.

20. Nikishin A., Ziegler P., Bolotov S., Fokin P. Late Palaeozoic to Cenozoic Evolution of the Black Sea-Southern Eastern Europe Region: A View from the Russian Platform. Turkish J. Earth Sc. 2011. 20. pp. 571–634.

21. Okay A., Nikishin A. Tectonic evolution of the southern margin of Laurasia in the Black Sea region. Int. Geol. Rev. 2015. 57(5-8). pp. 1051–1076.

22. Stampfli G.M. Tethyan oceans. Bozkurt E., Winchester J.A., Piper, J.D.A. (eds), *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area* – Geological Society, London, 2000. Special Publications. 173. pp. 1–23.

23. Tseng T.-L., Hsu H.-C., Jian P.-R., Huang B.-S., Hu J.-C., Chung S.-L. Focal mechanisms and stress variations in the Caucasus and Northeast Turkey from constraints of regional waveforms. *Tectonophysics*. 2016. Vol. 691. pp. 362–374.

24. Volfman Y.M., Kolesnikova E.Y., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective manifestation of tectogenic stress field within the Mediterranean belt (based on earthquake focal mechanism solutions). *Journal of Volcanology and Seismology*. 2017. Vol. 11. No. 6. pp. 447–461. DOI: 10.1134/S0742046317060069.

25. Wortel M., Spakman W. Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region. *Science*. 2000. 290. pp. 1910–1917.