

УДК 550.34

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001

Оригинальная статья

Инверсионный характер кинематических обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона

Ю.М. Вольфман[✉], Е.Я. Колесникова[✉], И.В. Калинин[✉]

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

Статья поступила: 08.04.2025, доработана: 19.05.2025, принята к публикации: 22.05.2025

Резюме: Актуальность работы. Одним из проявлений геодинамической нестабильности сейсмоактивных регионов являются инверсии полей напряжений (от лат. *inversio* – переворачивание). Они находят отражение в фокальных механизмах землетрясений, которые формировались в противоположных кинематических обстановках в течение коротких промежутков времени. Изучение инверсионных изменений напряженно-деформированного состояния земной коры способствует формированию представлений о современной геодинамике сейсмоактивных регионов. **Цель исследований:** идентификация инверсионных обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона и сравнительный пространственно-временной анализ их проявления в районах с разным геологическим строением. **Методы исследования.** В основу методики заложен алгоритм кинематического анализа данных о фокальных механизмах землетрясений, который предполагает разделение очагов землетрясений по кинематическим обстановкам их формирования (сжатия или растяжения) и исследование особенностей их пространственно-временного распределения. **Фактологической основой** послужили выборки данных по фокальным механизмам землетрясений из каталогов, размещенных на сайтах международных сейсмологических агентств, и из опубликованных региональных каталогов. **Результаты работы.** Обоснован инверсионный характер кинематических обстановок сейсмогенеза под воздействием периодически действующих напряжений юго-юго-западного–северо-северо-восточного сжатия и растяжения; построены стереографические модели этих обстановок. Инверсионные изменения происходили в течение коротких (менее 1-го года) промежутков времени. Обстановки сжатия и транспрессии в количественном и энергетическом отношении являются доминирующими: соответствующие им очаги локализованы, в основном, в континентальной части региона. Они являются прямыми индикаторами современных процессов орогенеза, взбросо- и надвигообразования в районах Большого Кавказа и Копетдага. В меньшей мере проявились обстановки растяжения и транстенсии. Они проявились в очагах землетрясений, сосредоточенных, в основном, в акватории Каспийского моря, на границе областей с корой континентального и субокеанического типа. Особенности локализации очагов этого типа являются прямым указанием на процессы деструкции в северном борту котловины с корой субокеанического типа – Южно-Каспийской впадины.

Ключевые слова: землетрясения, сейсмогенез, кинематические обстановки, инверсии, системы напряжений, оси сжатия (растяжения), фокальный механизм.

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной темы FZEG-2024-0016 Министерства науки и высшего образования РФ.

Для цитирования: Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я., Калинин И.В. Инверсионный характер кинематических обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 15(2): 73-86. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001

DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001

Original paper

Inversion character of kinematic conditions of seismogenesis in the Middle Caspian region

Yu.M. Volfman^{ORCID}, E.Ya. Kolesnikova^{ORCID}, I.V. Kalinyuk^{ORCID}

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

Received: 08.04.2025, revised: 19.05.2025, accepted: 22.05.2025

Abstract: Relevance. One of the manifestations of geodynamic instability in seismically active regions is the inversion of stress fields (from Latin *inversio* – inversion). They are reflected in the focal mechanisms of earthquakes, which formed in opposite kinematic environments over short periods of time. The study of inversion changes in the stress-strain state of the Earth's crust contributes to the formation of ideas about the modern geodynamics of seismically active regions. **Aim.** Identification of the inversion conditions of the seismogenesis of the Middle Caspian region and comparative spatial and temporal analysis of their manifestation in areas with different geological structures. **Methods.** The methodology is based on an algorithm for the kinematic analysis of data on the focal earthquake mechanisms, which involves the separation of earthquake foci according to the kinematic conditions of their formation (compression or stretching) and the study of the features of their spatial and temporal distribution. **The factual basis** was the sampling of data on the focal mechanisms of earthquakes from catalogs posted on the websites of international seismological agencies and from published regional catalogs. **Results.** The inversion character of the kinematic conditions of seismogenesis under the influence of periodically acting stresses of south-south-west–north-north-east compression and stretching is substantiated; stereographic models of these conditions are constructed. The inversion changes occurred over short (less than 1 year) time intervals. The conditions of compression and transpression are dominant in terms of quantity and energy: their corresponding foci are localized mainly in the continental part of the region. They are direct indicators of modern processes of orogeny, uplift and thrust formation in the Greater Caucasus and Kopetdag regions. To a lesser extent, the conditions of stretching and transtension were manifested. They manifested themselves in earthquake foci concentrated mainly in the waters of the Caspian Sea, on the border of areas with the crust of the continental and suboceanic type. The localization features of foci of this type are a direct indication of the destruction processes in the northern side of a basin with a suboceanic type crust – the South Caspian Depression.

Keywords: earthquakes, seismogenesis, kinematic situations, inversions, stress systems, compression (stretching) axes, focal mechanism.

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the scientific topic FZEG-2024-0016 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

For citation: Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Kalinyuk I.V. Inversion character of kinematic conditions of seismogenesis in the Middle Caspian region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 15(2): 73-86. DOI: 10.46698/VNC.2025.67.30.001

Введение

В ряде публикаций показано, что сейсмоактивные области представляют собой весьма динамичные геосистемы, в пределах которых кардинальные изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды и, соответственно, условий формирования землетрясений происходят в течение коротких промежутков времени [Широкова, 1967; Гущенко, 1979; Газлийские ..., 1986; Юнга, 1996;

Степаненко и др., 2013; Volfman et al., 2017 и др.]. Эти изменения обуславливают многообразие проявления кинематических обстановок сейсмогенеза, отражающих воздействие полей напряжений сжатия или растяжения в регионе и особенности ориентировок их главных осей относительно сторон света.

Одним из проявлений геодинамической нестабильности регионов являются инверсии (от лат. *inversio* – «переворачивание») сейсмогенерирующих полей напряжений, которые находят отражение в фокальных механизмах землетрясений, возникших в противоположных кинематических обстановках [Гущенко, 1979; Газлийские ..., 1986; Вольфман, Колесникова, 2022].

Наличие короткопериодных импульсов сжатия и растяжения коры по данным фокальных механизмов землетрясений было обосновано О.И. Гущенко [Гущенко, 1979]. Явление инверсии кинематических обстановок установлено при реализации Газлийских землетрясений 1976–1984 годов, в очагах которых происходила переориентировка тензора напряжений от юго-юго-западного (8.04.1976 г.) до восточно-юго-восточного (19.03.1984 г.) сжатия [Газлийские ..., 1986]. Инверсионный характер сейсмогенеза отмечается не только в земной коре, но и в верхней мантии, например, в области Вранча [Степаненко и др., 2013; Volfman et al., 2017]. Даже в областях, считавшихся асейсмичными, в центре Украинского щита (г. Кривой Рог, Украина) произошли землетрясения в противоположных кинематических обстановках – субширотного (25.12.2007 г.) и субмеридионального (23.06.2013 г.) сжатия [Пустовитенко и др., 2009, 2014]. На геодинамическую нестабильность и наличие инверсионных изменений сейсмогенеза указывают и механизмы очагов землетрясений, произошедших в пределах Каспийского моря и смежных территорий.

Актуальность настоящей работы обусловлена тем обстоятельством, что представления о кинематике сейсмогенных зон (то есть, о типе и ориентировке напряжений, предопределивших особенности активизации последних), нередко находят отражение в прогностических моделях разного целевого назначения, влияя на выводы прогнозных исследований. При этом не учитываются инверсионные изменения напряженно-деформированного состояния среды и их роль в современной геодинамике сейсмоактивных регионов. Цель исследований: идентификация инверсионных кинематических обстановок сейсмогенеза Среднекаспийского региона и сравнительный пространственно-временной анализ их проявления в пределах геоструктур, характеризующихся разным строением.

Исходные данные и методы исследования

Основой анализа кинематических обстановок сейсмогенеза послужили выборки данных по фокальным механизмам землетрясений из сейсмических каталогов, размещенных на сайтах Международного сейсмологического центра ISC (<https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/interactive>), ФИЦ Единая геофизическая служба РАН (<http://www.ceme.gsras.ru>), Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (<http://www.emsc-csem.org>) и Global CMT (<https://www.globalcmt.org>). Также использованы данные о механизмах очагов, опубликованные в научной литературе [Заманова, 2014; Етирмишли и др., 2022 и др.].

Объем анализируемой выборки составил 134 фокальных механизма для землетрясений, локализованных на участке с координатами 38–44° с.ш. и 44–56° в.д. В выборку вошли все идентифицированные очаги с магнитудами от 2,2 до 7,0; при этом большая их часть (около 70%) имеет значения $M \geq 4,0$.

В основу методики исследований заложен алгоритм тектонофизического анализа данных, предполагающий разделение очагов по кинематическим обстановкам формирования (разноориентированного сжатия или растяжения) и исследование особенностей их пространственно-временного распределения.

Идентификация обстановок в очагах выполнена в соответствии с классификацией типов напряженного состояния геологической среды [Гущенко и др., 1991; Гинтов, 2005; Ребецкий и др., 2017]. Согласно этой классификации, при сжатии и транспрессии (горизонтальном сжатии со сдвигом) формировались очаги взбросового, сдвиго-взбросового и взбросо-сдвигового типов; их общее количество составило 58 событий (43% от исследуемой выборки). Обстановкам растяжения и транстенсии (горизонтального растяжения со сдвиговой составляющей) отвечают сбросовый, сдвиго-сбросовый и сбросо-сдвиговый типы, также имеющие широкое распространение – 46 землетрясений (34% от общего количества). Кроме того, выборка включает 30 очагов сдвигового типа, формирование которых равновероятно как в обстановках сжатия, так и в условиях растяжения земной коры. Поскольку значения основных параметров сдвиговых фокальных механизмов имеют существенный разброс, не позволяя выделить доминирующие системы напряжений, землетрясения данного типа в работе не анализировались.

Результаты исследований и их обсуждение

Доминирующие кинематические обстановки сейсмогенеза. Результаты анализа фокальных механизмов землетрясений Среднекаспийского региона отражают влияние разнообразных, быстроменяющихся полей напряжений на процессы сейсмогенеза. Для очагов, обусловленных обстановками сжатия или транспрессии, направление действия структурообразующих напряжений определяется по ориентировке оси максимального сжатия (P). Аналогичным образом, в обстановках растяжения и транстенсии критерием определения кинематической обстановки являются направления оси максимального растяжения (T). Соотношения ориентировок этих осей в фокальных механизмах соответствующих типов приведены на роза-диаграммах, построенных не в относительном (в % соотношении), а в реальном (по количеству очагов) масштабе (рис. 1).

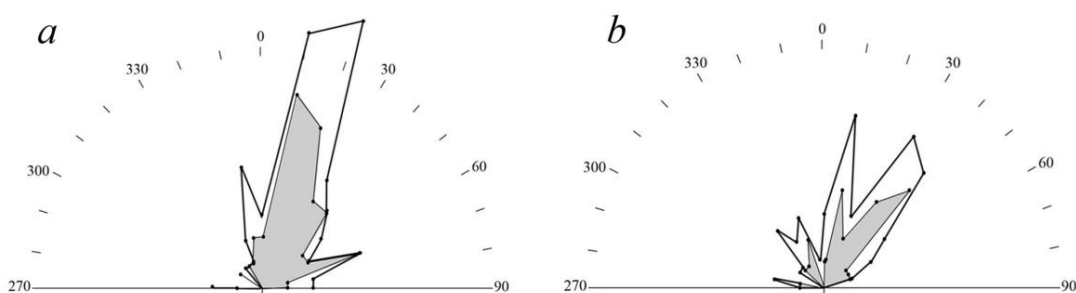


Рис. 1. Розы-диаграммы ориентировок осей максимального сжатия P (а) и максимального растяжения T (б) в фокальных механизмах землетрясений региона, сформировавшихся в обстановках, соответственно, сжатия и растяжения; контуром показаны все очаги данных обстановок, затенено – очаги только основных (взбросового и сбросового) типов /

Fig. 1. Roses-diagrams of the orientations of the axes of maximum compression P (a) and maximum elongation T (b) in the focal mechanisms of earthquakes in the region formed in conditions of compression and elongation, respectively; the contour shows all earthquake source of these situations, shaded – earthquake source of the main (reverse fault and normal fault) types

Анализ ориентировок осей сжатия в очагах взбросового типа показал, что значительное их количество (28, включая все события с $M \geq 6,0$) локализовано в диапазоне ориентировок $0-40^\circ$ с четко выраженным максимумом в направлении $10-20^\circ$ (на рис. 1а – затенено). Эта закономерность проявляется и в суммарном распределении осей P в очагах всех типов, отвечающих обстановкам сжатия и транспрессии: этому максимуму соответствуют значения параметров 41-го фокального механизма (на рис. 1а – показаны контуром).

Ориентировки осей растяжения в большинстве очагов сбросового типа (в 15-ти из 24-х, включая все землетрясения с $M \geq 6,0$) локализованы в том же диапазоне диаграммы, что и оси сжатия P взбросовых очагов – $10-40^\circ$, образуя при этом два выраженных максимума в направлениях 10° и $30-40^\circ$ (на рис. 1б – затенено). В суммарном распределении осей T в очагах сбросового, сбросо-сдвигового и сдвиго-сбросового типов, отвечающих обстановкам растяжения и транстенсии, указанные максимумы выглядят еще более выразительно: им соответствуют параметры 27-ми очагов (на рис. 1б – показаны контуром).

Таким образом, контрастные максимумы ($10-40^\circ$) ориентировок осей главных напряжений P и T (рис. 1) указывают на то, что формирование сейсмогенеза было обусловлено периодически сменяющимися друг друга (инверсионными) кинематическими обстановками сжатия и растяжения, действующими в ЮЮЗ–ССВ (близком к субмеридиональному) направлении.

Аналогичные обстановки ЮЮЗ–ССВ сжатия и растяжения преобладают и в очагах Средиземноморского пояса, в частности, в пределах его сегмента, протягивающегося от Пиренеев до Каспийского моря. Максимум ориентировок осей сжатия в очагах 464-х взбросовых землетрясений составляет $24 (204)^\circ$, а максимум осей растяжения в 557-и землетрясениях сбросового типа ориентирован в направлении $19 (199)^\circ$ (<https://www.globalcmt.org>).

Пространственные особенности проявления инверсионных обстановок. Землетрясения, формирование которых обусловлено воздействием ЮЮЗ–ССВ сжатия (41 событие, включая 28 очагов взбросового, 8 – сдвиго-взбросового и 5 – взбросо-сдвигового типов), локализованы в пределах 2-х зон северо-западного (общекавказского) простираения (рис. 2а).

Эти зоны трассируются с Кавказа (от Азербайджана, Дагестана) до Туркменистана, пересекая Каспийское море вдоль Апшеронско-Прибалханской зоны поднятий, разграничивающей Средне- и Южно-Каспийскую впадины. В тектоническом отношении эта область представляет собой зону сочленения гетерогенного фундамента Скифско-Туранской плиты и альпийской складчато-покровной системы Большого Кавказа–Копетдага [Международная ..., 2003; Глумов и др., 2004; Сенин и др., 2022; Senin et al., 2002; Свалова, 2019; Стогний, Стогний, 2023 и др.]. Согласно Базе данных активных разломов Евразии, здесь сконцентрировано наибольшее количество активных сейсмогенных структур, имеющих преимущественно общекавказское простираение [Zelenin et al., 2022].

Приблизительно в той же области (рис. 2б) локализованы землетрясения, обусловленные обстановками ЮЮЗ–ССВ растяжения (15 очагов сбросового, 9 – сбросо-сдвигового и 3 – сдвиго-сбросового типов, всего 27 событий). Повышенная концентрация очагов данных типов приходится на участки освоения нефтегазовых месторождений в акватории Каспийского моря (Нефтяные камни, Гонешли-Чираг-Азери и т.п.). Таким образом, некоторые землетрясения могут являться тех-

ногенно-индуцированными. Тем не менее, поскольку энергия техногенных событий, как правило, относительно невелика, данное обстоятельство не может существенно образом изменить представлений о характере естественной сейсмичности региона.

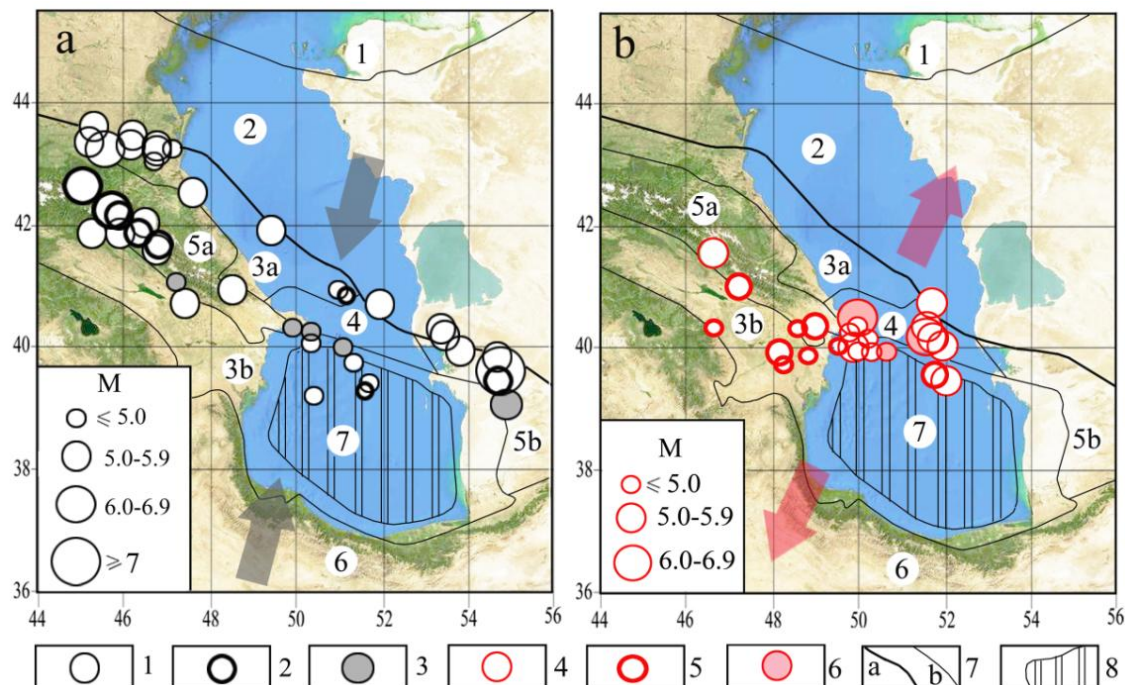


Рис. 2. Схемы размещения очагов землетрясений, сформированных в обстановках северо-северо-восточного (субмеридионального) сжатия (а) и растяжения (б). Условные обозначения:

1-3 – очаги взбросового (1), сдвига-взбросового (2) и взбросо-сдвигового (3) типов;
4-6 – очаги сбросового (4), сбросо-сдвигового (5) и сдвига-сбросового (6) типов;
7 – границы (а – между платформенными и складчатыми областями, б – между геоструктурами); 8 – кора субокеанического типа.

Цифрами обозначены: 1-2 – платформенные области: древняя Восточно-Европейская платформа (1), гетерогенная Скифско-Туранская плита (2); 3 – Терско-Каспийский передовой прогиб (3а) и межгорная Куринская впадина (3б); 4 – Апшеронно-Прибалханская зона поднятий;
5-6 – альпийские складчатые системы Большого Кавказа (5а), Копетдага (5б), Малого Кавказа–Эльбурса (6); 7 – Южно-Каспийская впадина. Стрелки – направления действия регионального сжатия (серые) и растяжения (красные) /

Fig. 2. Schemes of earthquake foci formed in the conditions of north-northeastern (submeridional) compression (a) and stretching (b). Symbols: 1-3 – foci of reverse fault (1), reverse fault with shear (2) and shear with reverse fault (3) types; 4-6 – foci of normal fault (4), shear with normal fault (5) and normal fault with shear (6) types; 7 – boundaries (a – between platform and folded areas, b – between geostructures); 8 – crust of suboceanic type. The numbers indicate: 1-2 – platform areas: the ancient East European Platform (1), the heterogeneous Scythian-Turanian plate (2); 3 – the Tersk-Caspian advanced trough (3a) and the intermountain Kura depression (3b); 4 – the Absheron-Balkhanian uplift zone; 5-6 – the alpine folded systems of the Greater Caucasus (5a), Kopetdag (5b), Lesser Caucasus-Elbursa (6); 7 – South Caspian depression with reduced crust of suboceanic type. The arrows represent the directions of regional compression (gray) and stretching (red)

Стереографические модели инверсионных обстановок сейсмогенеза. Близкие значения параметров фокальных механизмов, обусловленных попеременно действующими в направлении 10-40° напряжениями сжатия и растяжения, позволяют построить соответствующие этим обстановкам стереографические модели регионального сейсмогенеза.

Первая модель – взбросового типа (рис. 3а) характеризует обстановки горизонтального сжатия с ориентировкой оси P в направлении 17° с углом наклона 3° . При этом ось T занимает вертикальное положение, а промежуточная ось N является горизонтальной ($106/0^\circ$ – азимут и угол падения). Нодальные плоскости ($NP1$ и $NP2$), отражающие вероятное положение сейсмогенных разрывов в очагах, имеют общекавказское (286°) простирание. Одна из них ($NP1$) в структурно-кинематическом отношении идентифицируется как взброс, имеющий наклон в южных румбах под углом 48° , вторая ($NP2$) – как надвиг, падающий под углом 42° в северном направлении. Учитывая общую тенденцию уменьшения глубин очагов в направлении с ЮЮЗ на ССВ, можно полагать, что положению реальных сейсмогенных разрывов в большей мере соответствует нодальная плоскость $NP2$, что в структурном отношении вполне отвечает геодинамической модели Большого Кавказа, построенной на основе реологической стратификации литосферы [Стогний, Стогний, 2024].

Вторая стереографическая модель – сбросового типа (рис. 3б), отражает обстановку ЮЮЗ–ССВ горизонтального растяжения с ориентировкой оси T в направлении $208/0^\circ$ при субвертикальной оси сжатия P и горизонтальном ($298^\circ/2^\circ$) положении промежуточной оси N . Нодальные плоскости ($NP1$ и $NP2$) так же, как и в первой модели, имеют общекавказское простирание (292 – 298°), однако в структурно-кинематическом отношении идентифицируются как сбросы, имеющие наклон в противоположных направлениях под углами 44 – 45° .

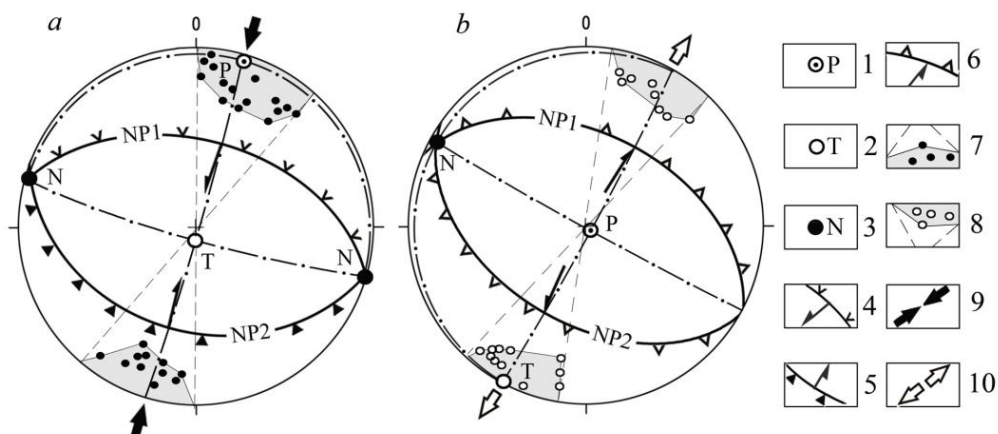


Рис. 3. Стереографические модели сейсмогенеза взбросового (а) и сбросового (б) типов для обстановок, соответственно, северо-северо-восточного (субмеридионального) сжатия и растяжения. Условные обозначения: 1-3 – проекции осей главных напряжений в моделях сейсмогенеза (1 – максимального сжатия, 2 – максимального растяжения, 3 – промежуточной); 4-6 – проекции нодальных плоскостей и их структурно-кинематическая характеристика (4 – взбросы, 5 – надвиги, 6 – сбросы), стрелки – направления перемещения висячего крыла; 7-8 – проекции осей главных напряжений в фокальных механизмах и сектора их локализации (7 – сжатия, 8 – растяжения); 9-10 – направления действия регионального сжатия (9) и растяжения (10) /

Fig. 3. Stereographic models of reverse fault (a) and normal fault (b) types of seismogenesis for north-northeastern (submeridional) compression and stretching, respectively. Symbols: 1-3 – projections of the axes of the main stresses in models of seismogenesis (1 – maximum compression, 2 – maximum tension, 3 – intermediate); 4-6 – projections of nodal planes and their structural and kinematic characteristics (4 – reverse faults, 5 – thrusts, 6 – normal faults), arrows – directions of movement of the upper wings; 7-8 – projections of the axes of the main stresses in the focal mechanisms and sectors of their localization (7 – compression, 8 – stretching); 9-10 – directions of action of regional compressions (9) and extensions (10) /

Сопоставление стереографических моделей регионального сейсмогенеза взбросового (рис. 3а) и сбросового (рис. 3б) типов, являющихся антиподами, указывает на практически полное совпадение границ секторов, соответственно, сжатия и растяжения в этих моделях. При этом расхождение ориентировок осей главных напряжений P и T , определяющих специфику кинематических обстановок, составляет всего 12° , отражая противоположный характер напряженно-деформированного состояния геологической среды.

Таким образом, основные кинематические обстановки, обусловившие формирование большей части землетрясений Среднекаспийского региона, отражают воздействие попеременно действующих напряжений ЮЮЗ–ССВ сжатия и растяжения. В процессе инверсии происходит замена взбросового режима в очагах на сбросовый; при этом положение оси P , определяющей направление сжатия, занимает ось T , указывая на растяжение в том же направлении (и наоборот). В обоих случаях теоретически наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов являются одни и те же сегменты (сектора) земной коры, соответствующие направлениям действия максимальных касательных напряжений. При этом в обстановках сжатия сейсмогенные разрывы реализуются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения. Однако с учетом наличия внутреннего трения в горном массиве, реальная картина разрывообразования в очагах может оказаться более сложной: разрывы, формирование которых обусловлено обстановками растяжения (сбросы), могут иметь более крутые углы падения, в то время как часть разрывов, образующихся в обстановках сжатия, будет представлена относительно пологими надвигами.

Региональные особенности проявления инверсионных обстановок сейсмогенеза. Исследованы следующие аспекты инверсионного процесса в регионе:

1. Продолжительность действия каждой из инверсионных обстановок и длительность разделяющих их интервалов.
2. Соотношение суммарной сейсмической энергии, выделившейся в очагах землетрясений, отвечающих той или иной обстановке, и оценка энергетического вклада очагов каждого типа в процесс сейсмогенеза.
3. Особенности пространственного распределения этих землетрясений по отношению к основным геоструктурам региона.

Результаты исследований приведены в порядке их перечисления.

1. Особенности изменений во времени напряженно-деформированного состояния геологической среды и, соответственно, кинематических обстановок сейсмогенеза, отражает хронограмма ориентировок осей напряжений в очагах, образовавшихся в противоположных обстановках (см. рис. 4).

Она позволяет оценить как продолжительность периодов непрерывного действия каждой обстановки, так и длительность интервалов, разделяющих проявления этих обстановок. На хронограмме приведены все очаги, отвечающие обстановкам ЮЮЗ–ССВ сжатия (взбросовые, сдвиго-взбросовые, взбросо-сдвиговые – верхний ряд) и растяжения (сбросовые, сдвиго-сбросовые, сбросо-сдвиговые – нижний ряд), ориентировки осей напряжений P и T которых образуют максимумы в диапазоне $10\text{--}40^\circ$, показанные контуром на рисунке 1.

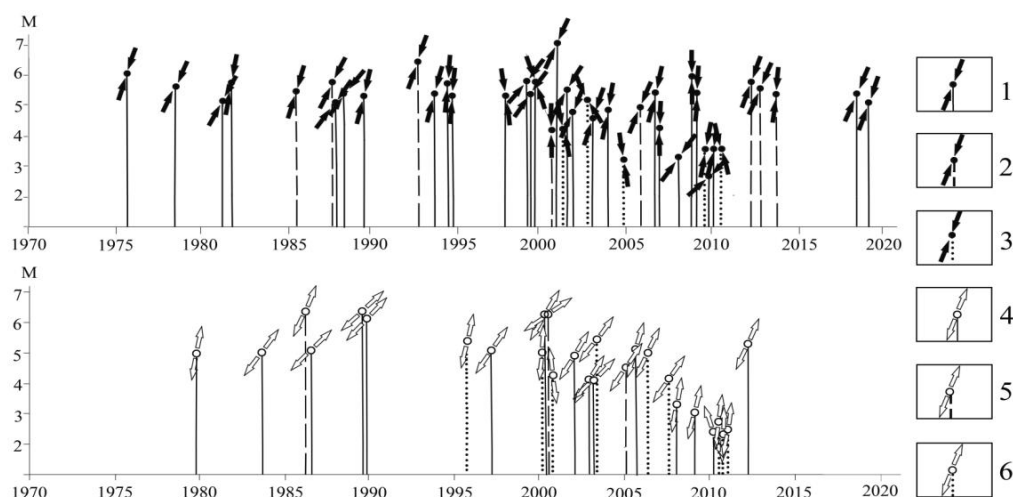


Рис. 4. Хронограмма проявления кинематических обстановок сейсмогенеза северо-северо-восточного (субмеридионального) сжатия (а) и растяжения (б) в пределах Среднекаспийского региона. Условные обозначения: 1-3 – очаги, сформированные в обстановках сжатия (1 – взбросового, 2 – сдвига-взбросового, 3 – взбросо-сдвигового типов); 4-6 – очаги, сформированные в обстановках растяжения (4 – сбросового, 5 – сдвига-сбросового, 6 – сбросо-сдвигового типов) /

Fig. 4. Chronogram of the manifestation of the kinematic conditions of the north-northeastern (submeridional) compression (a) and stretching (b) seismogenesis within the Middle Caspian region. Symbols: 1-3 – foci formed in compression environments (1 – reverse fault, 2 – reverse fault with shear, 3 – shear with reverse fault) types; 4-6 – foci formed in stretching environments (4 – normal fault, 5 – shear with normal fault, 6 – normal fault with shear types)

Кратковременность периодов проявления каждой из инверсионных обстановок сейсмогенеза, равно, как и длительность интервалов, разделяющих эти обстановки, обоснована сравнительными диаграммами, приведенными на рисунке 5. Эти временные параметры коррелируются между собой, имея максимумы протяженности от 0 до 5 и от 5 до 10 месяцев.

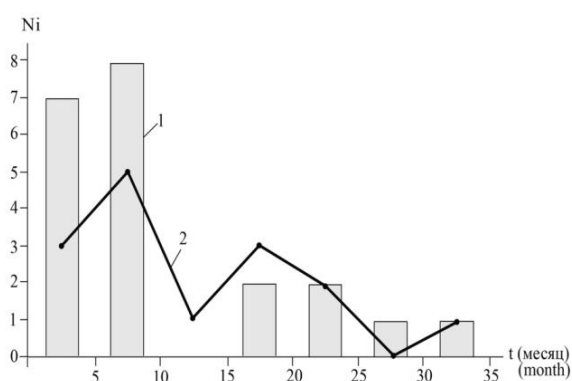


Рис. 5. Временные интервалы между проявлениями обстановок сжатия и растяжения (1) и продолжительность действия этих обстановок (2) /

Fig. 5. The time intervals between the manifestations of compression and stretching conditions (1) and the duration of these conditions (2)

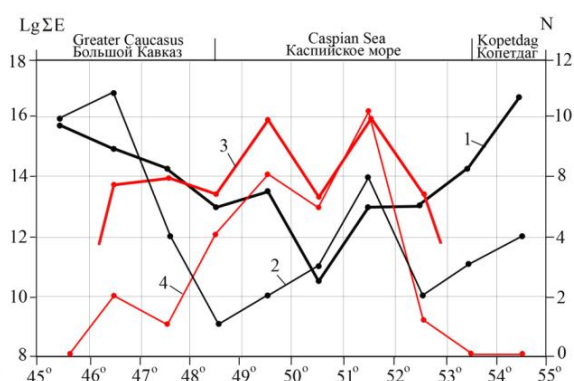


Рис. 6. Распределение (с запада на восток) величин логарифма суммарной выделенной энергии ($Lg\Sigma E$) и количества землетрясений (N) в очагах сжатия (1, 2) и растяжения (3, 4) /

Fig. 6. Distribution (from west to east) of the logarithm values of the total released energy ($Lg\Sigma E$) and the number of earthquakes (N) in the foci of compression (1, 2) and stretching (3, 4)

Таким образом, временной интервал между проявлениями противоположных кинематических обстановок, так же как и длительность периодов действия той или иной обстановки, большей частью, составляет менее 1-го года.

2. Инверсионным обстановкам сжатия и растяжения соответствует разное количество землетрясений (соответственно, 41 и 27 очагов), указывая на преобладающее влияние сжимающих напряжений на процесс регионального сейсмогенеза. Поскольку анализируемые события имеют разные магнитуды, для сравнительного анализа обстановок использован более универсальный показатель – примерное количество суммарной выделившейся энергии (ΣE , Дж) в очагах того или иного вида. Расчеты показывают, что и в данном случае сохраняется аналогичное соотношение: в обстановках сжатия этот показатель составляет $\Sigma E = 46,0 \cdot 10^{15}$ Дж (около 58% от общего количества энергии в 134-х очагах анализируемой выборки), тогда как при растяжении выделилось $\Sigma E = 20,1 \cdot 10^{15}$ Дж (более 25%).

Следует отметить неравноценный энергетический вклад очагов разных типов, сформированных в условиях, с одной стороны, прямого сжатия и растяжения, с другой – при транспрессии или транстенсии, т.е. при наличии сдвиговой составляющей. Так, в первом случае основная энергетическая нагрузка приходится на очаги взбросового типа, образовавшиеся в условиях прямого сжатия, составляя $42,2 \cdot 10^{15}$ Дж (92% от суммарной энергии обстановок инверсионного сжатия). При транспрессии эта величина существенно меньше: в очагах сдвиго-взбросового типа она составляет $3,8 \cdot 10^{15}$ Дж (~8%), взбросо-сдвигового – всего $0,02 \cdot 10^{15}$ Дж (<<1%). Сходная картина (в несколько иных соотношениях) характеризует и обстановки регионального растяжения и транстенсии: в очагах сбросового типа выделено более половины суммарной энергии – $11,6 \cdot 10^{15}$ Дж (58% от суммарной энергии инверсионных обстановок растяжения), сдвиго-сбросового – $8,3 \cdot 10^{15}$ Дж (41%) и сбросо-сдвигового – $0,2 \cdot 10^{15}$ Дж (~1%). Таким образом, основная роль в инверсионном процессе регионального сейсмогенеза принадлежит землетрясениям с очагами взбросового и сбросового типов.

3. Исследуемые землетрясения образуют зоны северо-западной ориентировки, приуроченные к форланду и к тыльной части складчатой системы Большого Кавказа-Копетдага (рис. 2). В акватории Каспийского моря очаги пространственно тяготеют к области Апшеронско-Прибалханской зоны поднятий, которая разграничивает Средне- и Южно-Каспийскую впадины (основание последней представлено корой субокеанического типа). При этом устанавливается поперечная (к простиранию этих геоструктур) зональность, выраженная количественно-энергетическими соотношениями очагов разных типов, отвечающих каждой из инверсионных обстановок (рис. 6).

Так, в пределах суши, а именно в районах Большого Кавказа и Копетдага, локализованы, главным образом, землетрясения, отвечающие обстановкам регионального сжатия. При этом они имеют более высокие значения магнитуд по сравнению с относительно малочисленными однотипными очагами, локализованными в акватории Каспийского моря (рис. 2а).

В то же время, большинство землетрясений (в том числе наиболее интенсивных, с высокими значениями магнитуд), обусловленных обстановками растяжения, локализовано в пределах акватории и пространственно тяготеет к Апшеронско-Прибалханской зоне поднятий, разграничивающей области с корой континентального и субокеанического типа. В меньшем количестве очаги растяжения распространены

в районе Большого Кавказа, а на восточном берегу Каспийского моря (в Копетдаге) их наличия не установлено (рис. 2б).

Эта тенденция отчетливо проявляется в латеральном распределении (с запада на восток) количества очагов, сформировавшихся в обстановках сжатия и растяжения, и логарифма суммарной выделившейся энергии в этих очагах. Данные, рассчитанные для сегментов, заключенных между целночисленными значениями меридианов (то есть, с шагом 1°), приведены на рисунке 6. Эти графики отражают существенное уменьшение сейсмической энергии и количества очагов, сформированных в обстановках сжатия, по направлению к Каспийскому морю как со стороны Большого Кавказа, так и со стороны Копетдага. В то же время, в распределении количества и энергии очагов, отвечающих региональному растяжению, наблюдается обратная тенденция: их максимумы приходятся на акваторию Каспийского моря, а именно – на Апшеронско-Прибалханскую зону поднятий, разграничивающую области с корой континентального и субокеанического типа (рис. 6). При этом на краях профиля, на удалении от акваториальной части, очаги, образованные в обстановках растяжения, отсутствуют.

Выводы

Таким образом, основные выводы относительно доминирующих обстановок сейсмогенеза в пределах Среднекаспийского региона сводятся к следующему:

1. Формирование регионального сейсмогенеза обусловлено, в основном, периодически сменяющими друг друга инверсионными обстановками сжатия и растяжения, действующими в ЮЮЗ–ССВ направлении; при этом их изменения происходили в течение коротких (менее 1-го года) временных интервалов.

2. Очаги землетрясений, возникшие в обстановках сжатия, локализованы, в основном, в континентальной части региона; они являются индикаторами современных процессов орогенеза, взбросо- и надвигообразования в районах Большого Кавказа и Копетдага.

3. Землетрясения обстановок растяжения доминируют в пределах акватории Каспийского моря. Местоположение, количество и энергетические характеристики этих очагов являются прямым указанием на современные процессы деструкции в северном борту котловины с корой субокеанического типа – Южно-Каспийской впадины.

Литература

1. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я. Инверсии сейсмогенерирующих полей напряжений как проявление геодинамической неустойчивости Крымско-Черноморского региона. // Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8(74). № 4. – С. 207–218.
2. Газлийские землетрясения 1976 и 1984гг. Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.
3. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. – 572 с.
4. Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: Недра-Бизнесцентр, 2004. – 342 с.
5. Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. // В сборнике статей: Поля напряжений и деформаций в литосфере. / Отв. редакторы А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. – М.: Наука, 1979. – С. 26–51.
6. Гущенко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А. Структура поля современного регио-

нального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса. // Доклады академии наук СССР. – 1991. – Т. 312. № 4. – С. 830–835.

7. Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э., Исмаилова С.С., Казымов И.Э. Современная геодинамика и сейсмичность Азербайджанского сектора Каспийского моря. // SOCAR Proceedings. – 2022. – № 4 – С. 8–16.

8. Заманова А.Г. Структура субдукционной зоны Южно-Каспийской впадины и сейсмичность. // Геофизический журнал. – 2014. – Т. 36. № 6. – С. 188–196.

9. Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления. Масштаб 1:2500000. Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН. Объяснительная записка. / Под редакцией В.Е. Хаина, Н.А. Богданова. – М.: Научный мир, 2003. – 120 с.

10. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Мержей Е.А. Процессы в очаговой зоне Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г. (Украина). // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. – С. 54–60.

11. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А. Процессы в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2007 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. – С. 17–22.

12. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. – 234 с.

13. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 77–93.

14. Сенин Б.В., Керимов В.Ю., Мустаев Р.Н., Леончик М.И. Структурно-геодинамические системы фундамента Черноморско-Каспийского региона и их эволюция в позднем палеозое-кайнозое. // Геотектоника. – 2022. – № 1. – С. 27–50.

15. 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.

16. Стогний В.В., Стогний Г.А. Глубинное строение и реологическая стратификация земной коры Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2024. – Т. 14. № 2. – С. 6–20.

17. Стогний Г.А., Стогний В.В. Южная граница Скифской плиты в системе блоковой делимости консолидированной коры Центрального и Восточного сегментов Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 6–18.

18. Широкова Е.И. Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморско-Азиатского сейсмического пояса. // Физика Земли. – 1967. – № 16. – С. 22–36.

19. Щукин Ю.К., Шебалин Н.В. Атлас глубинного строения очаговых зон землетрясений. / Отв. редактор А.А. Маловичко. – Воронеж: Научная книга, 2016. – 102 с.

20. Юнга С.Л. Сейсмотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии. // Физика Земли. – 1996. – № 12. – С. 37–58.

21. Senin B.V., Shainurov P.B., Ustiantsev V.L. Structural geology of the Northern and Middle Caspian on the basis of geological interpretation of geophysical data. // In: International conference on petroleum geology and hydrocarbon potential of the Black and Caspian sea. Baku. Abstracts Book. – 2002. – pp. 415–420.

22. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., 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.

23. Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The active faults of Eurasia database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. // Earth System Science Data. – 2022. – Vol. 14. – pp. 4489–4503.

References

1. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Inversions of seismic-generating stress fields as a manifestation of geodynamic instability of the Crimean-Black Sea region. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2022. Vol. 8(74). No. 4. pp. 207–218. (In Russ.)
2. The Gazli earthquakes of 1976 and 1984. Tashkent. Fan. 1986. 368 p. (In Russ.)
3. Gintov O.B. Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the Earth's crust of Ukraine. Kiev. Feniks. 2005. 572 p. (In Russ.)
4. Glumov I.F., Malovitsky Ya.P., Novikov A.A., Senin B.V. Regional geology and oil and gas content of the Caspian Sea. Moscow. Nedra-Business Center. 2004. 342 p. (In Russ.)
5. Gushchenko O.I. Reconstruction of megaregional tectonic stress field of seismically active regions of Eurasia. In: *Stress and strain fields in the lithosphere*. Eds. A.S. Grigoriev, D.N. Oso-kina. Moscow. Nauka. 1979. pp. 26–51. (In Russ.)
6. Gushchenko O.I., Mostryukov A.O., Petrov V.A. Structure of the modern regional stress field of seismically active zones of the Earth's crust in the eastern part of the Mediterranean active belt. *Doklady Earth Sciences USSR*. 1991. Vol. 312. No. 4. pp. 830–835. (In Russ.)
7. Yetirmishli G.J., Kazimova S.E., Ismailova S.S., Kazimov I.E. Modern geodynamics and seismicity of the Azerbaijan sector of the Caspian Sea. *SOCAR Proceedings*. 2022. No. 4. pp. 8–16. (In Russ.)
8. Zamanova A.G. Structure of the subduction zone of the South Caspian depression and seismicity. *Geophysical Journal*. 2014. Vol. 36. No. 6. pp. 188–196. (In Russ.)
9. International tectonic map of the Caspian Sea and its envelope. Scale 1:2500000. Institute of lithosphere of marginal and inland seas RAS. Explanatory note. Eds. V.E. Khain, N.A. Bogdanov. Moscow. Nauchnyi Mir. 2003. 120 p. (In Russ.)
10. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Merzhay E.A. Processes in the source zone of the Krivorozhskoe-III earthquake on 23 June 2013 (Ukraine). *Seismological Bulletin of Ukraine for 2013. Sevastopol. ECOSI-Hydrophysics*. 2014. pp. 54–60. (In Russ.)
11. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Kapitanova S.A. Processes in the source zone of the Krivorozhskoe earthquake on 25 December 2007. *Seismological Bulletin of Ukraine for 2007. Sevastopol. ECOSI-Hydrophysics*. 2009. p. 17–22. (In Russ.)
12. Rebetsky Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. From slip mirrors to tectonic stresses. *Methods and Algorithms*. Moscow. GEOS. 2017. 234 p. (In Russ.)
13. Svalova V.B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 77–93. (In Russ.)
14. Senin B.V., Kerimov V.Yu., Mustaev R.N., Leonchik M.I. Structural-geodynamic systems of the basement of the Black Sea-Caspian region and their evolution in the late paleozoic-cenozoic. *Geotectonics*. 2022. No. 1. pp. 27–50. (In Russ.)
15. Stepanenko N.Ya., Simonova N.A., Kardanets V.Yu. Spatial variations of principal stress axes in the Vrancea region earthquake sources. *Seismological Bulletin of Ukraine for 2012. Sevastopol. ECOSI-Hydrophysics*. 2013. pp. 46–56. (In Russ.)
16. Stogny V.V., Stogny G.A. Deep structure and rheological stratification of the earth's crust of the Central segment of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2024. Vol. 14. No. 2. pp. 6–22. (In Russ.)
17. Stogny G.A., Stogny V.V. Southern boundary of the Scythian plate in the system of block divisibility of the consolidated crust of the Central and Eastern segments of the Greater Caucasus. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 6–18. (In Russ.)
18. Shirokova E.I. Common patterns in the orientation of principal stresses in earthquake sources of the Mediterranean-Asian seismic belt. *Physics of the Earth*. 1967. No. 16. pp. 22–36. (In Russ.)

19. Shchukin Yu.K., Shebalin N.V. Atlas of depth structure of earthquake source zones. Ed. A.A. Malovichko. Voronezh. Nauchnaya Kniga. 2016. 102 p. (In Russ.)
20. Yunga S.L. Seismotectonic deformations and stresses in fold belts of neotectonic activation of Northern Eurasia. *Physics of the Earth*. 1996. No. 12. pp. 37–58. (In Russ.)
21. Senin B.V., Shainurov P.B., Ustiantsev V.L. Structural geology of the Northern and Middle Caspian on the basis of geological interpretation of geophysical data In: International conference on petroleum geology and hydrocarbon potential of the Black and Caspian sea. Baku. Abstracts Book. 2002. pp. 415–420.
22. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective Manifestation of seismogenic 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.
23. Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The active faults of Eurasia database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset. *Earth System Science Data*. 2022. Vol. 14. pp. 4489–4503.