

## ГЕОФИЗИКА

УДК 550.348.435

DOI: [10.46698/VNC.2023.83.75.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.83.75.004)

Оригинальная статья

## Динамика изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины в моделях сейсмогенеза

Ю.М. Вольфман 

Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Россия, 295007, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4, e-mail: [seism.volf@gmail.com](mailto:seism.volf@gmail.com)

Статья поступила: 28.04.2023, доработана: 26.05.2023, одобрена к публикации: 05.06.2023

**Резюме: Актуальность работы.** Изменения геодинамических обстановок и, соответственно, напряженно-деформированного состояния земной коры влияют на характер сейсмической активности региона. Прямыми критериями, позволяющими оценить пространственно-временные изменения в земной коре и установить общие закономерности формирования регионального сейсмогенеза, являются фокальные механизмы землетрясений. **Цель исследований.** Изучить деформационные режимы и кинематические обстановки регионального сейсмогенеза, исследовать влияние трансформаций и инверсий полей напряжений на пространственные и структурно-кинематические характеристики сейсмогенных разрывов. **Методы исследования.** Применен метод построения стереографических моделей сейсмогенеза по фокальным механизмам землетрясений, разработанный и апробированный автором при исследовании сейсмически активных регионов. **Результаты работы.** Приведены результаты тектонофизического анализа кинематических обстановок и деформационных режимов сейсмогенеза в пределах Черноморской впадины. В качестве критериев напряженно-деформированного состояния коры использовались типы деформационных режимов разрываобразования в очаге и кинематические обстановки сейсмогенеза. В совокупности они отражают характер напряженного состояния среды (сжатие или растяжение) и направление сжимающих или растягивающих усилий. Обосновано влияние на процессы сейсмогенеза первичных и вторичных, трансформированных полей напряжений. Построены стереографические квазимодели сейсмогенеза, которые аппроксимируют значения параметров фокальных механизмов, сформировавшихся в идентичных кинематических обстановках. Установлены основные особенности локальных трансформаций полей напряжений. Приведены специфические соотношения между параметрами квазимodelей сейсмогенеза первичного поля и значениями одноименных параметров фокальных механизмов землетрясений, сформированных в идентичной кинематической обстановке, но в условиях трансформированных систем напряжений. Во всех случаях трансформации происходят путем вращения тензора напряжений вокруг направления действия одной из главных осей с изменением положения двух других осей. Выполнен анализ изменения во времени кинематических обстановок в очагах землетрясений Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон Крымско-Черноморского региона. Исследованы кратковременные инверсионные изменения кинематических обстановок сейсмогенеза двух типов. В первом случае сжатие сменяется растяжением в том же направлении (и наоборот). Во втором случае одна из осей главных напряжений, которая определяет тип кинематической обстановки (например, сжатия), меняет свое направление на перпендикулярное к ее первоначальному положению. Установлены пространственно-кинематические параметры сейсмических разрывов, а также общие закономерности их образования в условиях воздействия инверсионных полей напряжений.

**Ключевые слова:** сейсмогенез, поля напряжений, оси главных напряжений, фокальные механизмы, кинематические обстановки, трансформации полей напряжений, инверсии полей напряжений.

**Для цитирования:** Вольфман Ю.М. Динамика изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины в моделях сейсмогенеза. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(2): 40-54. DOI: [10.46698/VNC.2023.83.75.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.83.75.004).

## GEOPHYSICS

DOI: [10.46698/VNC.2023.83.75.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.83.75.004)

Original papers

## Dynamics of changes in the stress-strain state of the Earth's crust of the Black Sea Basin in models of seismogenesis

Yu. M. Volfman 

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

Received: 28.04.2023, revised: 26.05.2023, accepted: 05.06.2023

**Abstract: Relevance.** Changes in geodynamic conditions and, accordingly, the stress-strain state of the Earth's crust affect the nature of seismic activity in the region. The focal mechanisms of earthquakes are the direct criteria that allow us to assess the spatio-temporal changes in the Earth's crust and to establish general patterns of the formation of regional seismogenesis. **Aim.** To study the deformation regimes and kinematic conditions of regional seismogenesis, to investigate the influence of transformations and inversions of stress fields on the spatial and structural-kinematic characteristics of seismogenic ruptures. **Methods.** The method of constructing stereographic models of seismogenesis based on the focal mechanisms of earthquakes, developed and tested by the author in the study of seismically active regions, is applied. **Results.** The results of the tectonophysical analysis of kinematic settings and deformation regimes of seismogenesis within the Black Sea basin are presented. The types of deformation modes of rupture formation in the hearth and kinematic conditions of seismogenesis were used as criteria for the stress-strain state of the crust. Collectively, they reflect the nature of the stressed state of the medium (compression or stretching) and the direction of compressive or tensile forces. The influence on the processes of seismogenesis of primary and secondary, transformed of the stress fields. Stereographic quasi-models of seismogenesis are constructed, which approximate the values of the parameters of focal mechanisms formed in identical kinematic settings. The main features of local transformations of stress fields are established. The specific relations between the parameters of the quasimodels of primary field seismogenesis and the values of the parameters of the same name of the focal mechanisms of earthquakes formed in an identical kinematic environment, but under conditions of transformed stress systems are given. In all cases, transformations occur by rotating the stress tensor around the direction of action of one of the main axes with a change in the position of the other two axes. The analysis of changes in time of kinematic conditions in earthquake foci of the South-Coast and Tuapse-Anapa seismogenic zones of the Crimean-Black Sea region is carried out. Short-term inversion changes of kinematic conditions of seismogenesis of two types are investigated. In the first case, compression is replaced by stretching in the same direction (and vice versa). In the second case, one of the axes of the main stresses, which determines the type of kinematic situation (for example, compression), changes its direction to perpendicular to its original position. The spatial and kinematic parameters of seismic discontinuities, as well as the general patterns of their formation under the influence of inversion stress fields, have been established.

**Keywords:** seismogenesis, stress fields, axes of main stresses, focal mechanisms, kinematic settings, stress field transformations, inversions of stress fields.

**For citation:** Volfman Yu.M. Dynamics of changes in the stress-strain state of the Earth's crust of the Black Sea Basin in models of seismogenesis. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(2): 40-54. DOI: [10.46698/VNC.2023.83.75.004](https://doi.org/10.46698/VNC.2023.83.75.004).

## Введение

Анализ изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины выполнен с использованием данных о фокальных механизмах землетрясений, которые позволяют отслеживать кратковременные вариации сейсмогенерирующих полей напряжений региона. В процессе анализа задействовано 52 опубликованных решения механизмов очагов [Пустовитенко 2002, 2022; Пустовитенко, Эреджепов, 2020, 2021а, б; Габсатарова и др., 2013а, б и др.], полученных на основе теории дислокации в рамках модели двойного диполя по методике [Введенская, 1969] с использованием знаков первых вступлений сейсмических волн на станции регистрации.

### Критерии оценки напряженно-деформированного состояния коры региона

В качестве основных критериев, характеризующих в момент землетрясения особенности напряженно-деформированного состояния коры, использовались: а) типы *деформационных режимов* разрывообразования в очаге, определяемые по соотношению углов наклона осей главных напряжений [Гущенко и др., 1991]; б) *кинематические обстановки* сейсмогенеза, отражающие характер напряженного состояния среды (сжатие или растяжение) и направление сжимающих или растягивающих усилий. При этом очаги, имеющие близкие значения параметров (ориентировок главных осей, векторов смещений, элементов залегания нодальных плоскостей) и характеризующиеся сходными кинематическими обстановками и деформационными режимами, объединялись в парагенезисы сейсмогенных разрывов и смещений, отражение которых на стереограмме рассматривается в качестве *стереографической модели сейсмогенеза*. Этот способ апробирован на тех сегментах Средиземноморского пояса, для которых имеются статистически представительные данные по фокальным механизмам землетрясений – Загрос, Вранча и других [Volfman et al., 2017]. Поскольку региональный каталог решений механизмов очагов для Черноморской впадины не столь представительен, результаты унификации тензоров напряжений в однотипных очагах для разных кинематических обстановок можно обозначить как «квaziмодели».

Большинство землетрясений исследуемой выборки является коровыми с гипоцентрами на глубинах до 40 км; и только два из них могут рассматриваться как нижнекоровые или верхнемантийные. Особенности их пространственной локализации отражают приуроченность однотипных фокальных механизмов к разным геоструктурам региона (рис. 1).

В качестве основных критериев, характеризующих в момент землетрясения особенности напряженно-деформированного состояния коры, использовались: а) типы *деформационных режимов* разрывообразования в очаге, определяемые по соотношению углов наклона осей главных напряжений [Гущенко и др., 1991]; б) *кинематические обстановки* сейсмогенеза, отражающие характер напряженного состояния среды (сжатие или растяжение) и направление сжимающих или растягивающих усилий. При этом очаги, имеющие близкие значения параметров (ориентировок главных осей, векторов смещений, элементов залегания нодальных плоскостей) и характеризующиеся сходными кинематическими обстановками и деформационными

режимами, объединялись в парагенезисы сейсмогенных разрывов и смещений, отражение которых на стереограмме рассматривается в качестве *стереографической модели сейсмогенеза*. Этот способ апробирован на некоторых сегментах Средиземноморского пояса, для которых имеются статистически представительные данные по фокальным механизмам землетрясений – Загрос, Вранча и других [Volfman et al., 2017]. Поскольку региональный каталог решений механизмов очагов для Черноморской впадины не столь представительен, результаты унификации тензоров напряжений в однотипных очагах для идентичных кинематических обстановок можно обозначить как «квазимодели».

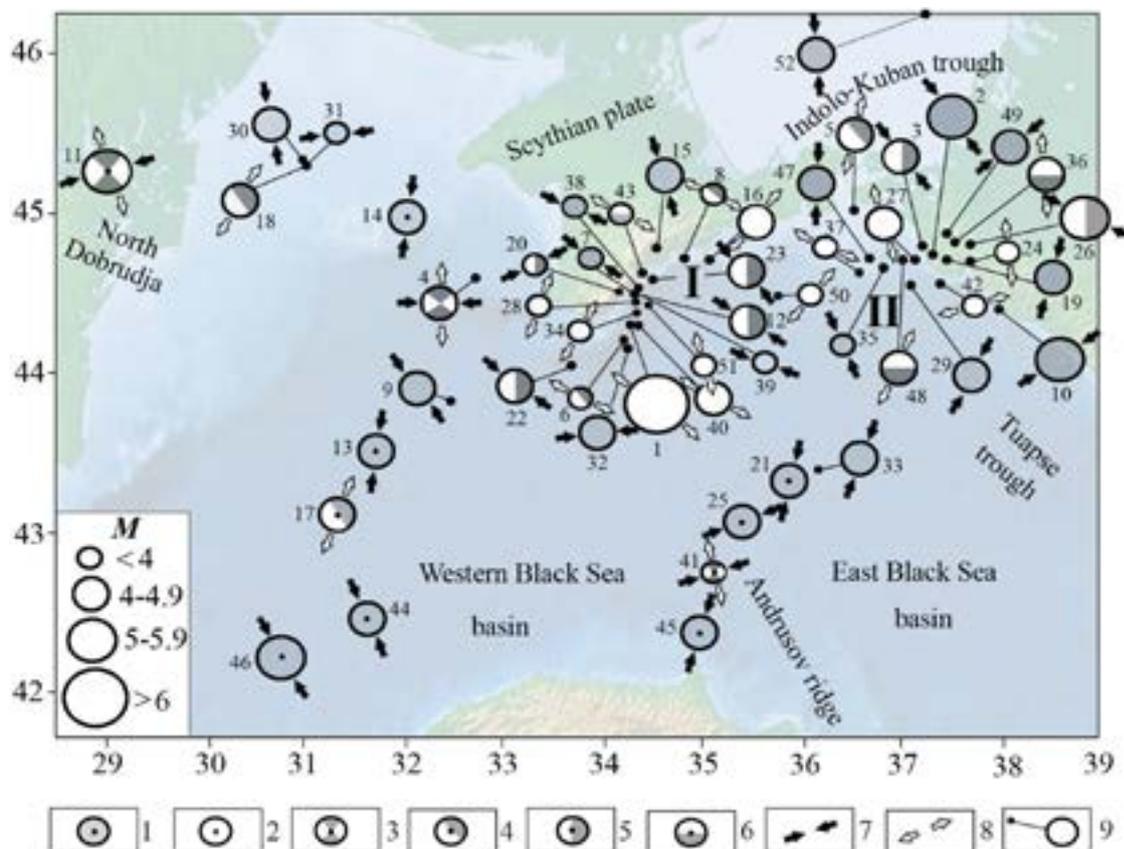


Рис. 1. Схема размещения землетрясений региона, для которых получены решения механизмов очагов. Условные обозначения: 1–6 – тип деформационного режима в очаге (1 – взбросовый, 2 – сбросовый, 3 – сдвиговый, 4 – сдвиго-сбросовый, 5 – взбросо-сдвиговый, 6 – сбросо-сдвиговый); 7–8 – направление действия напряжений, обусловивших обстановки сжатия (7) и растяжения (8); 9 – очаги, снесенные от их местоположения; размер пуансонов пропорционален магнитуде землетрясения (врезка). Арабские цифры – номера очагов в региональном каталоге фокальных механизмов [Вольфман и др., 2022]; римские цифры – области максимальной концентрации очагов: I – Южнобережная, II – Туапсинско-Анапская / Fig. 1. Distribution scheme of earthquakes in the region, for which the solutions of focal mechanisms were obtained. Legend: 1–6 – type of deformation regime in the source (1 – thrust fault, 2 – slip fault, 3 – shift fault, 4 – shift–slip fault, 5 – thrust–shift fault, 6 – slip–shift fault); 7–8 – the direction of action of the stresses that caused the conditions of compression (7) and tension (8); 9 – sources removed from their location; the size of the punches is proportional to the magnitude of the earthquake (inset). Arabic numbers are source numbers in the regional catalog of focal mechanisms [Volfman et al., 2022]; Roman numerals are areas of maximum concentration of sources: I – Yuzhnoberezhnaya, II – Tuapse–Anapa

## Методы исследований

В количественном отношении в регионе доминируют очаги, отнесенные (по [Гинтов, 2005]) к «идеальным» деформационным режимам – взбросовому, сбросовому и сдвиговому, в которых две оси главных напряжений являются субгоризонтальными, а третья – субвертикальной. Они составляют 73% от общего числа фокальных механизмов, являясь индикаторами кинематических обстановок в квазимоделях регионального сейсмогенеза. Отметим, что из почти 2-х тысяч землетрясений Средиземноморского пояса (от Атлантического океана до Каспийского моря и от Северной Африки до Центральной Европы), для которых получены решения механизмов, «идеальным» режимам отвечает более 80%. Такое соотношение обусловлено горизонтальными перемещениями литосферных плит, к границам которых приурочены основные сейсмогенные пояса Земли. На этом основании поля напряжений, предопределившие наличие «идеальных» режимов, отнесены к категории *первичных, нетрансформированных* [Вольфман и др., 2022].

Очаги, значения параметров которых существенно отличаются от основной массы фокальных механизмов, отражая проявления «комбинаторных» (взбросо- и сбросо-сдвигового, сдвиго-сбросового) типов деформационных режимов, составляют 27% от общего количества и присущи не всем кинематическим обстановкам. Усложнение режимов сейсмогенеза обусловлено разворотом тензора напряжений, который является следствием локальной трансформации (от лат. *transformatio* – «преобразование», «превращение») первичного поля, позволяя обозначить данные системы напряжений как *трансформированные*. Это подтверждается незначительным количеством очагов Средиземноморского пояса, отвечающих «комбинаторным» деформационным режимам, где они составляют менее 20%.

## Результаты работы и их обсуждение

**Стереографические квазимодели регионального сейсмогенеза.** В результате усреднения значений параметров фокальных механизмов (ориентировок главных осей, векторов смещений, элементов залегания нодальных плоскостей), характеризующих сходными кинематическими обстановками и «идеальными» деформационными режимами, получено девять квазимodelей сейсмогенеза, отражающих разные условия напряженно-деформированного состояния земной коры региона (рис. 2). Фактологическое их наполнение (количество фокальных механизмов в их составе) различно: в первичных (нетрансформированных) полях напряжений наиболее выражены обстановки субмеридионального сжатия и растяжения в том же направлении (рис. 2а, е). Однако в энергетическом отношении весьма значимыми являлись и обстановки юго-восточного–северо-западного растяжения, обусловившие формирование самого сильного за последние 100 лет разрушительного Ялтинского землетрясения 11 сентября 1927 г. с магнитудой  $M_w=6,9$ .

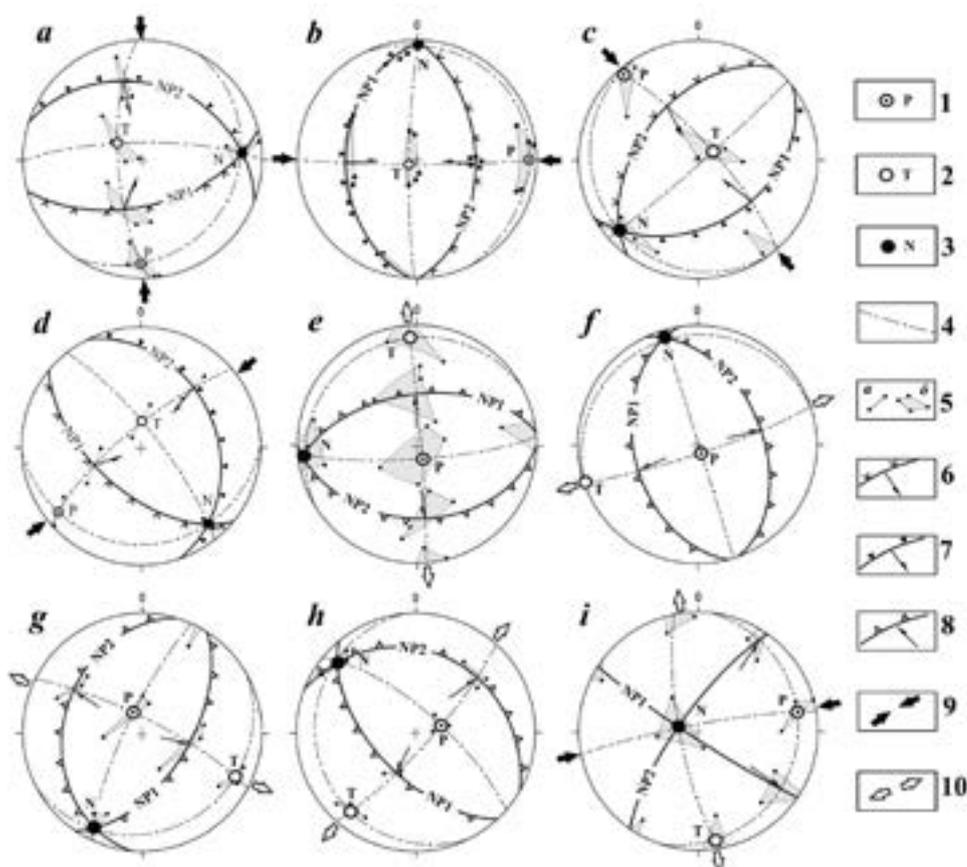


Рис. 2. Квазимодели сейсмогенеза для кинематических обстановок сжатия (а – меридионального, б – широтного, с – юго-восточного, д – юго-западного), растяжения (е – меридионального, ф – широтного, г – юго-восточного, h – юго-западного) и равновероятного меридионального сжатия–широтного растяжения (i). Условные обозначения: 1-3 – проекции осей главных напряжений (1 – сжатия, 2 – растяжения, 3 – промежуточной); 4 – проекции плоскостей размещения осей главных напряжений; 5 – разброс значений одноименных параметров в квазимоделях, аппроксимирующих данные 2-х (а) и более (b) фокальных механизмов; 6-8 – проекции нодальных плоскостей и их характеристика (6 – взбросы, сдвиго-взбросы, 7 – надвиги, 8 – сбросы, сдвиго-сбросы), бергштрихи – со стороны падения плоскости, стрелки – направления перемещения висячего крыла; 9 – направления сжатия; 10 – направления растяжения /

Fig. 2. Quasi-models of seismogenesis for kinematic settings of compression (a – meridional, b – latitudinal, c – southeast, d – southwest), extension (e – meridional, f – latitudinal, g – southeast, h – southwest.) and equiprobable meridional compression–latitudinal extension (i). Legend: 1-3 – projections of the main stress axes (1 – compression, 2 – tension, 3 – intermediate); 4 – plane projections for the placement of the axes of the main stresses; 5 – scatter of the values of the parameters of the same name in the quasi-models approximating the data of 2 (a) and more (b) focal mechanisms; 6-8 – projections of nodal planes and their characteristics (6 – thrust faults, shift–thrust faults, 7 – overthrusts, 8 – slip faults, shift–slip faults); 9 – directions of compression; 10 – tension directions

Данные квазимодели аппроксимируют значения параметров всех 52-х фокальных механизмов Черноморской впадины и отражают многообразие первичных полей напряжений и кинематических обстановок сейсмогенного разрывообразования региона.

**Особенности трансформаций первичных полей напряжений.** Выше отмечалось, что усложнение основных режимов сейсмогенеза, является следствием ло-

кальных трансформаций первичных полей напряжений. Причиной трансформаций является изменение соотношения абсолютных величин напряжений, количественная оценка которых неосуществима ввиду недостатка данных. Трансформации первичного поля присущи не всем кинематическим обстановкам регионального сейсмогенеза. Так, в условиях субмеридионального и субширотного сжатия, субширотного сжатия–субмеридионального растяжения таковые не проявились.

Установлены специфические соотношения между параметрами квазимоделей сейсмогенеза первичного поля и значениями одноименных параметров фокальных механизмов землетрясений, сформированных в идентичной кинематической обстановке, но в условиях трансформированных систем напряжений. Во всех случаях трансформации происходят путем вращения тензора напряжений вокруг направления действия одной из главных осей с изменением положения двух других осей (рис. 3а–е). При этом углы вращения и, соответственно, смещения осей относительно их первоначального положения, как правило, составляют  $(45 \pm 10)^\circ$ . По-видимому, в природных геосистемах, подверженных релаксации и/или трансформации, такой механизм дискретного изменения полей напряжений является наименее энергозатратным.

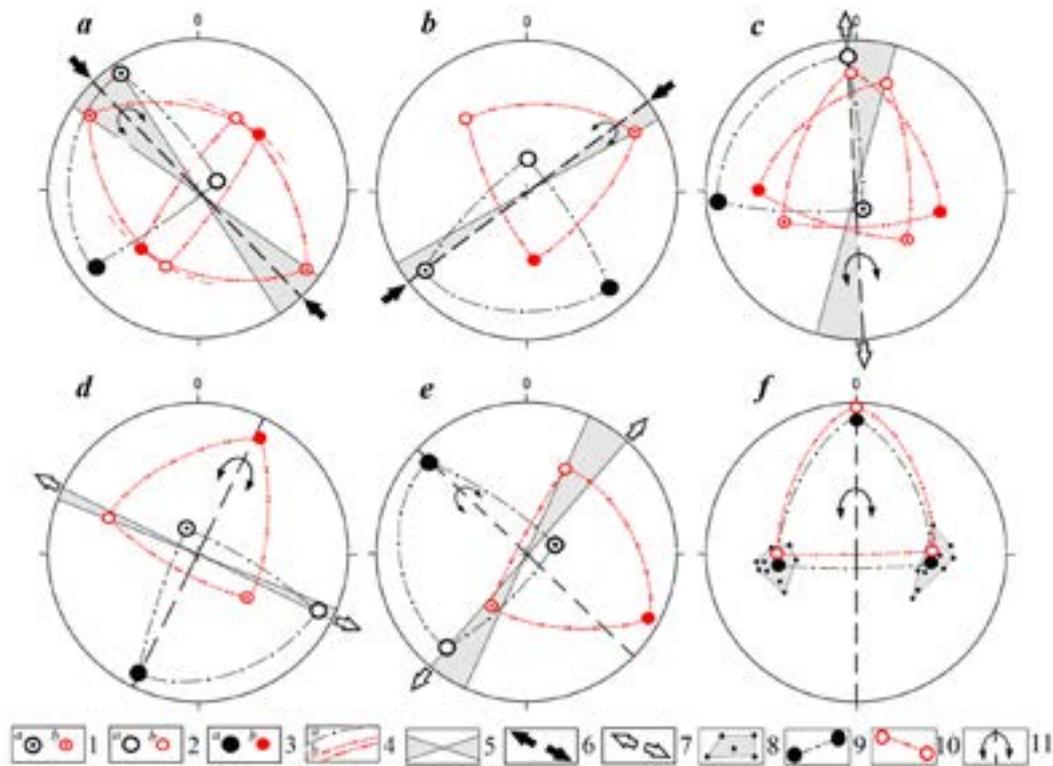


Рис. 3. Особенности трансформаций первичного поля в обстановках: а, б – юго-восточного и юго-западного сжатия; с, d, e – субмеридионального, юго-восточного и юго-западного растяжения; f – «реальная» (черное) и «идеальная» (красное) модели отклонения двух главных осей от направления третьей оси. Условные обозначения: 1 – проекции осей сжатия P для квазимоделей (a) и очагов трансформированного поля (b); 2 – то же самое – для осей растяжения T; 3 – то же самое – для промежуточных осей N; 4 – проекции плоскостей размещения осей напряжений для квазимоделей (a) и очагов (b); 5 – секторы сжатия–растяжения; 6, 7 – направления сжатия (6) и растяжения (7); 8 – области отклонений двух главных осей от направления третьей (независимо от их названия); 9 – проекции осей и плоскостей их размещения в «реальной» модели трансформированных полей; 10 – то же самое, для «идеальной» модели; 11 – ось вращения тензора напряжений /

Fig. 3. Features of transformations of the primary field in the following settings: a, b – southeast and southwest compression; c, d, e – submeridional, southeastern, and southwestern extension; e – “real” (black) and “ideal” (red) models of deviation of two main axes from the direction of the third axis. Legend: 1 – projections of the compression axes  $P$  for quasi-models (a) and sources of the transformed field (b); 2 – the same – for the tension axes  $T$ ; 3 – the same – for intermediate axes  $N$ ; 4 – plane projections for the placement of stress axes in quasi-models (a) and sources (b); 5 – compression–tension sectors; 6, 7 – directions of compression (6) and tension (7); 8 – areas of deviations of two main axes from the direction of the third (regardless of their name); 9 – projections of the axes and planes of their placement in the “real” model of the transformed fields; 10 – the same for the “ideal” model; 11 – axis of rotation of the stress tensor

При этом углы вращения и, соответственно, смещения осей относительно их первоначального положения, как правило, составляют  $(45 \pm 10)^\circ$ . По-видимому, в природных геосистемах, подверженных релаксации и/или трансформации, такой механизм дискретного изменения полей напряжений является наименее энергозатратным.

В общем виде особенности трансформаций отражает стереограмма, где приведены величины отклонений двух главных осей от направления третьей оси (независимо от их названия), вокруг которой происходит вращение тензора напряжений (рис. 3e). Среднее значение в совокупностях отклонений от оси вращения составляет  $(45 \pm 1)^\circ$ , что позволяет обосновать модель тензора напряжений, общую для всех типов трансформированных систем. Как видно из стереограммы, построенная («реальная») модель отличается от «идеальной», в которой ось вращения принята строго горизонтальной, лишь небольшим углом наклона этой оси.

Приведенные особенности трансформаций первичных систем напряжений дополняют обоснованное в работе [Volfman et al., 2017] положение о «поясном» характере распределения главных осей в процессе сейсмогенеза. Согласно этому положению, первый круговой пояс, протягивающийся вдоль внешней границы стереограммы, образует концентрации осей главных напряжений в условиях проявления основных деформационных режимов. Второй пояс (под углами  $35 \div 55^\circ$  к горизонту) отражает распределение главных осей в тензорах трансформированных систем напряжений.

**Инверсии кинематических обстановок сейсмогенеза.** Ранее в ряде работ отмечалась пространственно-временная изменчивость кинематических обстановок в очагах землетрясений, локализованных даже в ограниченных сегментах земной коры [Гущенко, 1979; Степаненко и др., 2013; Шебалин и др., 1986; Широкова, 1967; Юнга, 1996; Казымова, Казымов, 2020; Стогний и др., 2022, 2023]. Изменения напряженно-деформированного состояния коры Черноморской впадины весьма явственно отражают инверсии сейсмогенерирующих полей напряжений (от лат. *inversio* – «переворачивание, перестановка»). Они проявляются в решениях механизмов очагов, сформированных в противоположных кинематических обстановках в течение коротких временных интервалов как непосредственно друг за другом, так и безотносительно к последовательности их возникновения.

В регионе установлены инверсии полей напряжений 2-х видов (рис. 4):

– 1-го вида, когда вследствие изменения кинематической обстановки на противоположную (например, сжатие сменяется растяжением в том же направлении) происходит замена взбросового режима на сбросовый; при этом положение оси  $P$ , определяющей направление сжатия, занимает ось  $T$ , указывая на растяжение в том же направлении (и наоборот);

– 2-го вида, когда происходит изменение ориентировки тензора напряжений таким образом, что та из осей напряжений, которая определяет тип кинематической обстановки (сжатия или растяжения), меняет свое направление почти под прямым углом к ее первоначальному положению.

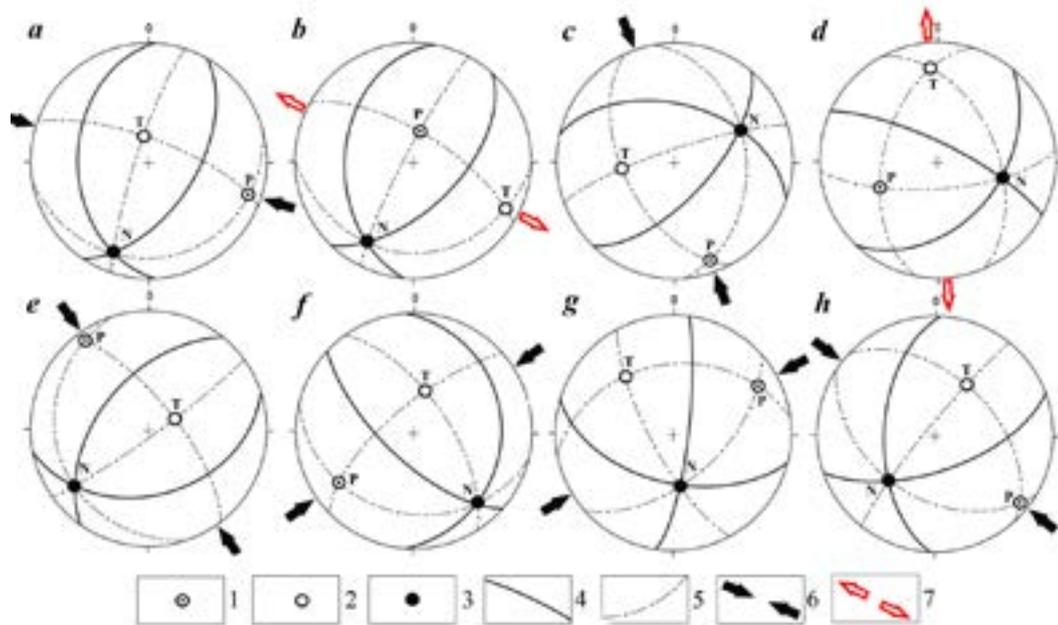


Рис. 4. Отражение инверсий кинематических обстановок в фокальных механизмах землетрясений: *a-d* – инверсий 1-го вида в парах очагов 09.12.2013 (*a*) и 02.03.2014 (*b*); 30.01.2012 (*c*) и 10.12.2012 (*d*); *e-h* – инверсий 2-го вида в парах очагов 12.07.1966 (*e*) и 03.09.1978 (*f*); 22.11.1996 (*g*) и 02.06.1999 (*h*). Условные обозначения: 1–3 – проекции осей главных напряжений: сжатия (1), растяжения (2), промежуточной (3); 4 – проекции нодальных плоскостей; 5 – проекции плоскостей размещения осей главных напряжений; 6 – направления сжатия; 7 – направления растяжения /

Fig. 4. Reflection of inversions of kinematic conditions in the focal mechanisms of earthquakes: (*a-d*) inversions of the 1st type in pairs of sources on 09.12.2013 (*a*) and 02.03.2014 (*b*); 30.01.2012 (*c*) and 10.12.2012 (*d*); (*e-h*) inversions of the 2nd type in pairs of sources on 12.07.1966 (*e*) and 03.09.1978 (*f*); 22.11.1996 (*g*) and 02.06.1999 (*h*). Legend: 1–3 – projections of the main stress axes: compression (1), tension (2), intermediate (3); 4 – projections of nodal planes; 5 – projections of the planes of placement of the axes of the main stresses; 6 – directions of compression; 7 – tension directions

В наиболее общем виде инверсии 1-го вида проявлены в альтернативных квази-моделях сейсмогенеза, например, меридионального сжатия и растяжения (рис. 2*a, d*), широтного сжатия и растяжения (рис. 2*b, e*) и т.д., то есть в условиях, когда сжимающие и растягивающие усилия попеременно действовали в одном и том же направлении. Инверсионные соотношения этого вида отражают и пары фокальных механизмов, приведенные на рисунке 4 (*a-b* и *c-d*). Парные механизмы в нижнем ряду этого рисунка являются иллюстрацией проявления инверсий 2-го вида (рис. 4*e-f, g-h*).

Особенности изменений во времени кинематических обстановок сейсмогенеза (в т.ч. инверсионных) отражает хронограмма ориентировок напряжений (рис. 5) в очагах землетрясений Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон (положение зон см. на рис. 1). Она же позволяет установить пары или группы близких (по времени их реализации) событий, в которых проявился инверсионный характер полей напряжений.

Последовательный (пособытийный) анализ инверсионных проявлений сейсмогенеза и промежуточных (между ними) изменений напряженно-деформированного состояния земной коры показал, что временные интервалы, в течение которых происходила полная инверсия сейсмогенерирующих полей напряжений в регионе, как правило, весьма незначительны – от нескольких месяцев до нескольких лет (рис. 5). В качестве примеров короткопериодных инверсий 1-го вида можно привести пары очагов №35 (30.01.2012) – №36 (10.12.2012) и №39 (09.12.2013) – №40 (02.03.2014), локализованных, соответственно, в пределах Туапсинско-Анапской и Южнобережной сейсмогенных зон. Инверсии 2-го вида, происходившие в течение нескольких лет путем последовательных изменений кинематических обстановок (через реализацию промежуточных напряженно-деформированных состояний коры), нашли отражение в фокальных механизмах №3 (22.07.1972) – №10 (03.09.1978) Туапсинско-Анапской зоны и №20 (22.11.1996) – №22 (18.10.1998), локализованных у побережья Крыма.

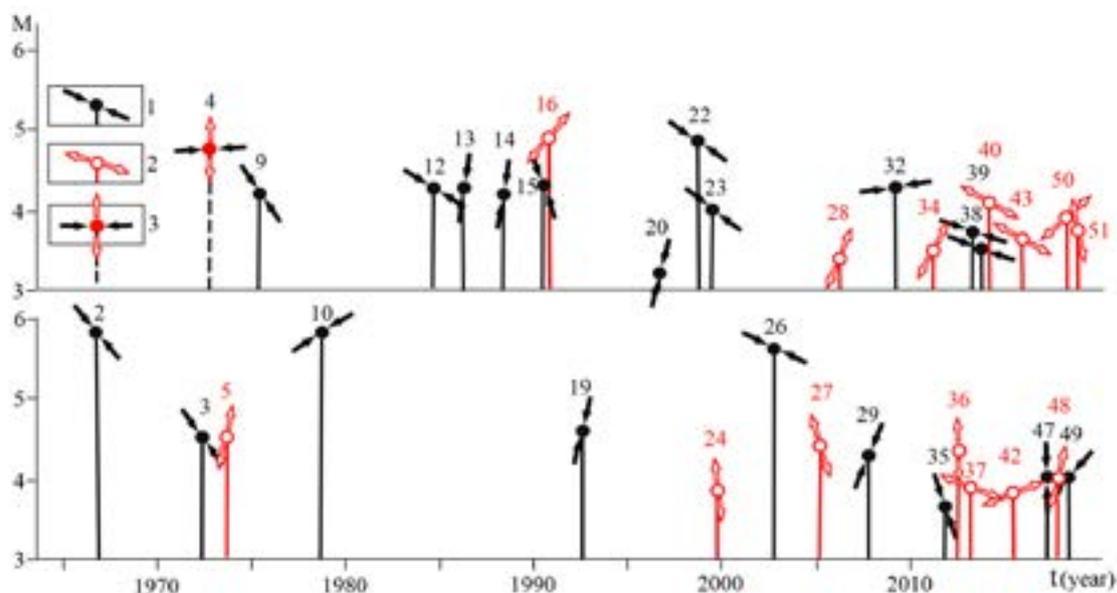


Рис. 5. Хронограмма изменения кинематических обстановок сейсмогенеза в пределах Южнобережной (верхний ряд) и Туапсинско-Анапской (нижний ряд) зон. Условные обозначения: 1 – очаги, сформированные в обстановках сжатия; 2 – очаги, сформированные в обстановках растяжения; 3 – очаги сдвигового типа (формирование которых равновероятно как в обстановках субширотного сжатия, так и субмеридионального растяжения). Цифры и стрелки – номера очагов (на рис. 1), направления сжатия (черные) и растяжения (красные) /

Fig. 5. Chronogram of changes in the kinematic conditions of seismogenesis within Yuzhnoberezhnaya (upper row) and Tuapse–Anapa (lower row) zones. Legend: 1 – sources formed in compression environments; 2 – sources formed in tension conditions; 3 – shiit–type sources (the formation of which is equally probable both in settings of sublatitudinal compression and submeridional tension). The numbers and arrows are the numbers of the sources (in Fig. 1), the directions of compression (black) and tension (red)

Таким образом, приведенная хронограмма ориентировок напряжений в очагах землетрясений Южнобережной и Туапсинско-Анапской зон отражает многообразие проявлений и быструю сменяемость кинематических обстановок регионально-го сейсмогенеза.

**Общие особенности сейсмогенного разрывообразования в регионе.** Общие особенности разрывообразования в очагах землетрясений региона проявляются

при сопоставлении параметров квазимodelей сейсмогенеза, отражающих противоположные кинематические обстановки. Алгоритм данного подхода предполагает попарное совмещение на стереограммах положений осей  $P$  и  $T$ , а также проекций нодальных плоскостей альтернативных квазимodelей, обусловленных влиянием сжимающих и растягивающих напряжений, попеременно действующих в одном направлении [Вольфман и др., 2022].

Анализ показал, что на стереограммах, где совмещены квазимodelи для противоположных обстановок сжатия и растяжения, нодальные плоскости, идентифицируемые, соответственно, как взбросы (или надвиги) и сбросы, имеют близкие значения параметров, а проекции осей  $P$  и  $T$  меняются местами, располагаясь вблизи внешнего круга стереограмм (рис. 6). При этом в сопоставляемых парах квазимodelей разница углов падения разрывов (взбросов и сбросов), имеющих наклон в одном направлении, составляет от  $1^\circ$  до  $15^\circ$  (среднее значение –  $7^\circ$ ); а расхождения между проекциями осей  $P$  и  $T$  примерно такого же порядка: от  $4^\circ$  до  $14^\circ$  (среднее –  $9^\circ$ ).

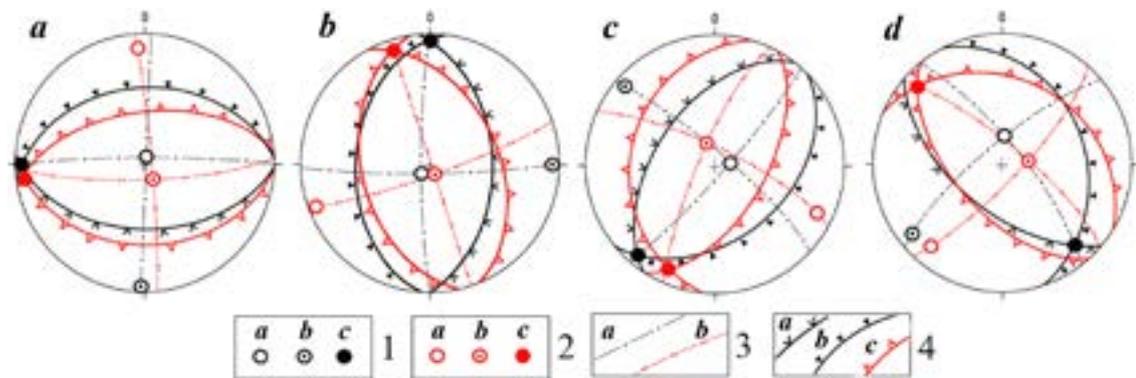


Рис. 6. Соотношение проекций осей напряжений и нодальных плоскостей в квазимodelях, аппроксимирующих обстановки сжатия и растяжения в направлениях: а – субмеридиальном; б – субширотном; в – юго-восточном–северо-западном; д – юго-западном–северо-восточном. Условные обозначения: 1 – проекции осей напряжений в квазимodelях обстановок сжатия (а – ось  $P$ , б – ось  $T$ , в – ось  $N$ ); 2 – то же самое – в квазимodelях обстановок растяжения; 3 – проекции плоскостей размещения осей главных напряжений в квазимodelях сжатия (а) и растяжения (б); 4 – проекции нодальных плоскостей и их характеристики: взбросы (а), надвиги (б), сбросы (в) /

Fig. 6. Correlation between the projections of stress axes and nodal planes in quasi-models approximating compression and tension in the directions: a – submeridional; b – sublatitudinal; c – southeast–northwest; d – southwest–northeast. Legend: 1 – projections of stress axes in quasi-models of compression conditions (a – P axis, b – T axis, c – N axis); 2 – the same – in quasi-models of tension conditions; 3 – plane projections for the placement of the axes of main stresses in the quasi-models of compression (a) and tension (b); 4 – projections of nodal planes and their characteristics: thrust faults (a), overthrusts (b), slip faults (c)

Таким образом, процессы сейсмогенного разрывообразования в регионе обусловлены, в основном, влиянием горизонтальных напряжений, на что указывают незначительные углы наклона осей  $P$  и  $T$  в квазимodelях, характеризующих первичные (нетрансформированные) системы напряжений. Следовательно, в инверсионных обстановках наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов, соответственно, как взбросового, так и сбросового типов являются одни и те же сегменты в разрезе земной коры, имеющие наклоны под углами  $(45 \pm 10)^\circ$  к горизонтальной поверхности и отвечающие положениям плоскостей максимальных касательных напряжений.

Данное обстоятельство предопределяет основные особенности деформирования геологической среды в условиях горизонтального сжатия и растяжения, попеременно действующих в одном направлении. В обоих случаях образуются (активируются) преимущественно плоскости одних и тех же систем разрывов, при этом в обстановках сжатия они проявляются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения (рис. 6). Реальная картина разрывообразования в очагах может выглядеть сложнее. В работе [Гинтов, 2005] отмечено, что согласно теории прочности Ш. Кулона–А. Навье–О. Мора, образование сколовых разрывов зачастую происходит под углом, не равным  $45^\circ$  к направлению действия осей нормальных напряжений, а с отклонением их в сторону оси максимального сжатия (минимального растяжения). Следовательно, сейсмогенные разрывы, обусловленные обстановками растяжения (сбросы), могут иметь более крутые падения (под углами  $\geq 45^\circ$  к земной поверхности), в то время как разрывы, образующиеся в обстановках сжатия, будут представлены преимущественно надвигами с углами падения  $\leq 45^\circ$ . При этом в очагах землетрясений (относительно немногочисленных), обусловленных влиянием трансформированных систем напряжений, тензоры напряжений и, соответственно, проекции нодальных плоскостей смещаются приблизительно на  $45^\circ$  относительно их положений в первичных системах напряжений. Вследствие этого, одна их нодальных плоскостей занимает положение, близкое к горизонтальному, вторая становится практически вертикальной.

### Выводы

Анализ фокальных механизмов землетрясений и квазимоделей сейсмогенеза, аппроксимирующих параметры очагов, сформировавшихся в сходных условиях, позволил обосновать причины и особенности изменений напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины. Установлено, что эти изменения обусловлены трансформациями первичных полей напряжений с усложнениями типов деформационных режимов разрывообразования в очагах, а также сменой кинематических обстановок сейсмогенеза вплоть до полной инверсии последних.

1. Сопоставление параметров квазимоделей, характеризующих первичные поля напряжений, и фокальных механизмов, обусловленных влиянием трансформированных систем, показало, что трансформации полей напряжений носят закономерный характер: они происходят путем вращения тензора напряжений вокруг направления действия одной из главных осей с изменением положения двух других осей (независимо от их названия) на величину, близкую  $45^\circ$  (рис. 3e).

2. Соотношения параметров фокальных механизмов, сформированных в противоположных кинематических обстановках, отражают два вида инверсий сейсмогенирующих полей напряжений. В первом случае сжатие в очагах сменяется растяжением в том же направлении с заменой взбросового деформационного режима сбросовым (и наоборот). Во втором случае происходит изменение ориентировки тензора напряжений таким образом, что ось главных напряжений, определяющая тип кинематической обстановки (например, сжатия), меняет направление на перпендикулярное к своему первоначальному положению (рис. 4). Периоды инверсионных циклов весьма кратковременны – от нескольких месяцев до нескольких лет (рис. 5). При этом инверсии полей напряжений в пределах Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон происходят не синхронно, что свидетельствует

о локальном характере влияния геодинамических факторов, обусловивших эти процессы.

3. Инверсионный характер напряжений предопределил закономерности сейсмогенного разрывообразования в регионе, установленные по соотношению параметров квазимodelей сейсмогенеза, обусловленных противоположными кинематическими обстановками. В условиях воздействия инверсионных систем напряжений теоретически наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов являются одни и те же сегменты в разрезе земной коры, отвечающие направлениям действия максимальных касательных напряжений первичного поля. При этом в обстановках сжатия разрывы реализуются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения (рис. 6).

4. Многообразие кинематических обстановок, идентифицированных в очагах землетрясений, отражает гетерогенный характер и сложное строение сейсмогенных региональных зон, обусловленные изменениями напряженно-деформированного состояния земной коры Черноморской впадины, что не позволяет обосновать принадлежность этих зон к какому-либо одному типу сейсмогенеза.

### Литература

1. Введенская А.В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. – М.: Наука, 1969. – 136 с.
2. Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я. Новые результаты тектонофизического анализа фокальных механизмов землетрясений Крымско-Черноморского региона. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2022. – Т. 8(74). №4. – С. 162–206.
3. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Малянова Л.С. Северный Кавказ. // Землетрясения Северной Евразии в 2007 г. – Обнинск: ГС РАН, 2013а. – С. 100–115.
4. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Малянова Л.С., Якушева В.Н. Землетрясение 10 декабря 2012 г. с  $M_w=4.6$  с вблизи г. Анапы // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 г. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013б. – С. 35–45.
5. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. – Киев: Феникс, 2005. – 572 с.
6. Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. // Поля напряжений и деформаций в литосфере. – М.: Наука, 1979. – С. 26–51.
7. 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. – №4. – С. 830–835.
8. Казымова С.Э., Казымов И.Э. Геодинамика Талышского региона по данным механизмов очагов землетрясений и GPS-станций. // Геология и геофизика Юга России. – 2020. – Т. 10(3). – С.40–56. DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003
9. Пустовитенко Б.Г. Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона последних 20 лет. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2002. – С. 59–64.
10. Пустовитенко Б.Г. Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017 г.).
11. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона. // Землетрясения Северной Евразии в 2014 г. – 2020. – Вып. 23. – С. 250–262.
12. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-

Черноморского региона в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. – 2021а. – Вып. 24. – С. 226–236.

13. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Скорректированные очаговые параметры землетрясений Крыма 2018-2019 гг. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – 2021б. – Том 7 (73). №4. – С. 164–175.

14. 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.

15. Стогний В.В., Заалишвили В.Б., Пономарева Н.Л. Современная геодинамика и сейсмичность Северного Кавказа: проблемы мониторинга. // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – Т. 12. №2). – С. 34–52. DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003

16. Стогний В.В., Стогний Г.А., Пономарева Н.Л. Сейсмоструктура южной части Центрального сегмента Большого Кавказа. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – Т. 13. №1. – С. 76–96. DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006.

17. Шебалин Н.В., Ибрагимов Р.Н., Чернов Ю.К. и др. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. – Ташкент: Фан, 1986. – 368 с.

18. Широкова Е.И. Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморско-Азиатского сейсмического пояса. // Физика Земли. – 1967. – №1. – С. 22–36.

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

20. Volfman Y.M., Kolesnikova E.Y., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective manifestation of tectonic 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

## References

1. Vvedenskaya A.V. Study of stresses and ruptures in earthquake sources using the theory of dislocations. Moscow. Nauka, 1969. 136 p. (In Russ.)
2. Volfman Y.M., Pustovitenko B.G., Kolesnikova E.Ya. New results of tectonophysical analysis of focal mechanisms for earthquakes in the Crimean-Black Sea region. In: Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2022. Vol. 8. Issue 74. No. 4. pp. 162–206. (In Russ.)
3. Gabsatarova I.P., Selivanova E.A., Malyanova L.S. North Caucasus. Earthquakes of Northern Eurasia in 2007. Obninsk, GS RAS, 2013a. pp. 100–115. (In Russ.)
4. Gabsatarova I.P., Selivanova E.A., Malyanova L.S., Yakusheva V.N. The earthquake of December 10, 2012 with  $M_w=4.6$  near Anapa. Seismological bulletin of Ukraine, 2012. Sevastopol, 2013b. pp. 35–45. (In Russ.)
5. 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.)
6. Gushchenko O.I. Reconstruction of the field of megaregional tectonic stresses in seismically active regions of Eurasia. Stress and strain fields in the lithosphere. Moscow. Nauka, 1979. pp. 26–51. (In Russ.)
7. 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. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. 1991. No. 4. pp. 830–835. (In Russ.)
8. 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. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2020.35.39.003
9. Pustovitenko B.G. Focal mechanism of perceptible earthquakes in the Crimean-Black

Sea region of the last 20 years. Seismological bulletin of Ukraine, 2000. Sevastopol, 2002. pp. 59–64. (In Russ.)

10. Pustovitenko B.G. Catalog of earthquake source mechanisms in the Crimean-Black Sea region for 2016–2017. Earthquakes in Northern Eurasia. 2022. Issue. 25 (2016–2017). (In Russ.)

11. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. Spectral and source parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region. Earthquakes in Northern Eurasia in 2014. 2020. Issue. 23. pp. 250–262. (In Russ.)

12. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2015. Earthquakes in Northern Eurasia. 2021a. Issue. 24. pp. 226–236. (In Russ.)

13. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. Corrected focal parameters of earthquakes in Crimea in 2018-2019. In: Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. 2021b. Volume 7. Issue 73. No. 4. pp. 164–175. (In Russ.)

14. Stepanenko N.Ya., Simonova N.A., Kardanets V.Yu. Spatial variations of principal stress axes in earthquake sources in the Vrancea region. Seismological bulletin of Ukraine, 2012. Sevastopol, 2013. pp. 46–56. (In Russ.)

15. Stogny V.V., Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Ponomareva N.L. Modern geodynamics and seismicity of the North Caucasus: problems of monitoring. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2022. Vol. 12. No.2. pp. 34-52. (in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2022.25.32.003

16. Stogny V.V., Stogny G.A., Ponomareva N.L. Seismotectonics of the southern part of the Greater Caucasus Central segment. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No.1. pp. 76-96. in Russ.) DOI: 10.46698/VNC.2023.45.94.006

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

18. Shirokova E.I. General regularities in the orientation of principal stresses in earthquake sources in the Mediterranean-Asian Seismic Belt. *Physics of the Solid Earth*. 1967. No. 1. pp. 22–36. (In Russ.)

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

20. 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