

**РАЗДЕЛ 5.  
ГЕОФИЗИКА И СЕЙСМОЛОГИЯ**

**УДК 550.34**

**КИНЕМАТИКА СЕЙСМОГЕНЕЗА СРЕДНЕКАСПИЙСКОГО РЕГИОНА.**

**Статья 1. ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ  
И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ**

**Вольфман Ю. М.<sup>1</sup>, Колесникова Е. Я.<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, Симферополь, Российская Федерация*  
*E-mail: <sup>1</sup>seism.volf@gmail.com*

Одним из проявлений геодинамической нестабильности сейсмоактивных регионов являются инверсии полей напряжений. Они находят отражение в фокальных механизмах землетрясений, возникших в противоположных кинематических обстановках. В работе исследованы инверсии процесса сейсмогенеза Среднекаспийского региона, обусловленные периодически действующими доминирующими напряжениями юго-юго-западного–северо-северо-восточного сжатия и растяжения. Первые из них являются индикаторами современных проявлений орогенеза и надвигообразования в районах Большого Кавказа и Копетдага. Обстановки растяжения отражают 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.

**ВВЕДЕНИЕ**

Сейсмоактивные области представляют собой весьма динамичные геосистемы, в пределах которых кардинальные изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды, происходящие в течение относительно коротких промежутков времени, обуславливают высокую степень вариативности кинематических обстановок сейсмогенеза. Они находят отражение как в смене характера напряженного состояния среды — сжатия или растяжения, так и в различии ориентировок осей главных напряжений в очагах землетрясений, предопределяя, тем самым, гетерогенный характер большинства сейсмогенных зон [5, 38]. Наиболее ярко это проявляется при инверсии сейсмогенирующих полей напряжений (от лат. *inversio* — «переворачивание»), которая находит отражение в фокальных механизмах землетрясений, возникших в противоположных кинематических обстановках [3, 4, 32].

В настоящее время представления о кинематике сейсмогенных зон зачастую формируются на основе пространственной приуроченности землетрясений к разрывным геоструктурам региона разного масштаба, структурно-кинематического типа и генезиса. В случае противоречивых толкований природы этих геоструктур разными авторами, сейсмогенным зонам, как правило, присваиваются характеристики, отражающие геодинамические предпочтения самого исследователя. При этом не учитываются изменения напряженно-деформированного состояния среды и их роль в геодинамике сейсмоактивных регионов. Подобное отождествление спорных или недостаточно

обоснованных структурно-кинематических параметров разломной геоструктуры и пространственно совмещенной с ней сейсмогенной зоны нередко искажает представления о тектонических предпосылках возникновения сейсмичности региона и приводит к ошибочному толкованию современных геодинамических процессов.

*Актуальность* настоящей работы обусловлена необходимостью исследования напряженно-деформированного состояния земной коры и его изменений в очагах землетрясений основных сейсмогенных зон для уточнения представлений о современной геодинамике Среднекаспийского региона во всем многообразии ее проявлений.

*Целью исследований* являлись идентификация кинематических (в том числе, инверсионных) обстановок региона, определение их роли в общем процессе сейсмогенеза и пространственно-временной анализ их проявления в пределах районов с разным геологическим строением.

*Предметом исследований* послужили совокупности фокальных механизмов землетрясений, которые пространственно приурочены к основным разрывным геоструктурам Среднекаспийского региона, разграничивающим платформенные и складчатые области. Соответственно, *объектом исследования* в настоящей работе являлась наиболее протяженная и структурно выраженная зона высокой сейсмической активности, приуроченная к границе альпийского пояса и Скифско-Туранской плиты, которая также разграничивает (в акваториальной части региона) области с земной корой континентального и субокеанического типов.

Алгоритм исследований включает: а) изучение инверсионных кинематических обстановок сейсмогенеза, являющихся доминантными и играющими значимую роль в современной геодинамике региона; б) анализ трансформаций сейсмогенерирующих полей напряжений в процессе регионального сейсмогенеза. Соответственно, результаты работы приводятся в двух статьях, первая из которых отражает пространственно-временные особенности проявления инверсионных обстановок сейсмогенеза. Во второй статье (публикация которой предполагается в одном из следующих номеров журнала) анализируются типы трансформаций первичных полей напряжений и закономерный характер проявления этих трансформаций как в Среднекаспийском регионе, так и в пределах иных сейсмоопасных территорий.

В ряде публикаций отмечалось, что в пределах сейсмоактивных областей кардинальные изменения условий формирования землетрясений происходят в течение коротких промежутков времени [9, 32, 35, 38]. Так, наличие короткопериодных импульсов сжатия и растяжения коры по данным анализа фокальных механизмов землетрясений было обосновано О. И. Гуценко [9]. 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 [32]. Инверсионный характер сейсмогенеза отмечается не только в земной коре, но и в верхней мантии, например, в области Вранча [27, 38]. 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 [21, 22]. На геодинамическую нестабильность и наличие короткопериодных, в том числе,

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

инверсионных, изменений сейсмогенеза указывают и механизмы очагов землетрясений, локализованных в пределах Каспийского моря и смежных территорий [11, 12, 34].

### КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГИОНА

Тектоническое районирование региона. Район исследований охватывает центральную часть Каспийского моря и примыкающие к ней территории Кавказа и Копетдага, характеризующиеся сложным геологическим строением [2, 7, 13, 15, 19, 29], активной геодинамикой [16, 17, 24, 25, 33] и специфическими особенностями строения литосферы [1, 14, 26, 28]. Основные особенности строения региона определяют крупные геоструктурные элементы, различающиеся возрастом, генезисом и составом слагающих их образований (с севера на юг) [18]: юго-восточная окраина древней Восточно-Европейской платформы, молодая (главным образом, эпигерцинская) Скифско-Туранская плита и структуры Альпийского орогенно-складчатого пояса – покровно-надвиговые системы Большого Кавказа и Копетдага, а также смежные с ними передовые прогибы и межгорные впадины (рис. 1а).

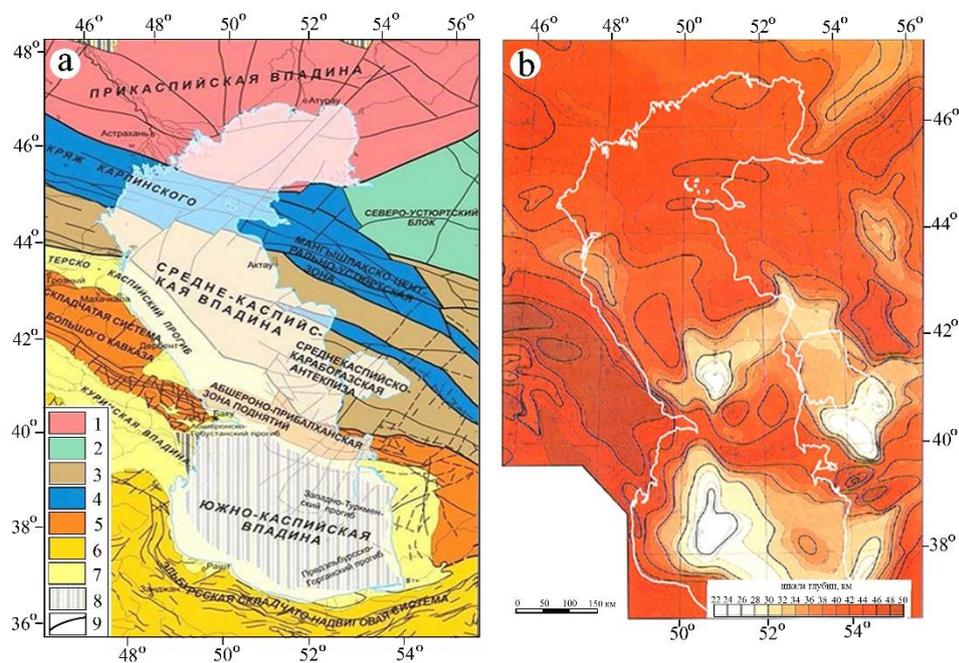


Рис. 1. Тектоническое районирование Каспийского региона (а), по [18], и карта рельефа поверхности раздела Мохо (б), по [7]. Условные обозначения: 1–4 — фундамент платформенных областей (1 — раннедокембрийский, 2 — байкальский, 3 — герцинский, 4 — раннекиммерийский); 5–6 — альпийские складчато-покровные системы (5 — Большой Кавказ и Копетдаг, 6 — Малый Кавказ, Талыш, Эльбурс); 7 — передовые прогибы и межгорные впадины; 8 — впадина с корой океанического типа; 9 — разрывные нарушения, соответствующие границам крупных геоструктур.

Составлено авторами по [17, 18].

Возраст пород, слагающих фундамент платформенных областей, колеблется от докембрийского (Восточно-Европейская платформа) до позднепалеозойско-раннетриасового и триас-юрского (в основании Скифско-Туранской плиты). Поверхность фундамента разбита на отдельные блоки разрывными нарушениями, в основном, западно-северо-западного (общекавказского) простирания, которые предопределяют общий структурный рисунок региона. Граница между древней Восточно-Европейской и молодой Скифско-Туранской платформами проводится вдоль северного склона Кряжа Карпинского и Северо-Устюртского блока (рис. 1а).

Граница Скифско-Туранской платформы и покровно-складчатых структур Альпийского пояса проходит вдоль северного борта Терско-Каспийского прогиба и Апшероно-Прибалханской зоны поднятий.

Мощность земной коры в пределах Каспийского моря и примыкающих к ней территорий изменяется от 20 до 58 км (рис. 1б). Резкие градиенты этих изменений установлены на склонах Большого Кавказа и в южном обрамлении Каспийского моря — в пределах Эльбурс-Малокавказской складчато-надвиговой системы, расположенной южнее исследуемого района. При этом Южно-Каспийская впадина (наиболее глубоководная часть с глубинами до 1025 м), отделенная от остального морского бассейна Апшероно-Прибалханской зоной поднятий, характеризуется относительно небольшими (22–30 км) глубинами залегания раздела Мохо [7, 31, 36 и др.], что позволяет отнести эту впадину к внутренним бассейнам субокеанического типа с редуцированной земной корой [18 и др.].

**Системы активных разломов и сейсмичность Каспийского региона.** По мнению [7, 39 и др.], структура земной коры региона предопределена наличием разрывных нарушений 2-х основных направлений — западно-северо-западного (общекавказского) и восточно-северо-восточного (антикавказского). В меньшей мере проявлены разрывы субмеридиональной ориентировки (так называемых уральской или каспийской систем). Первые два направления свидетельствуют о влиянии альпийских движений Кавказа на формирование земной коры, третье указывает на возможную роль позднеальпийских движений в регионе, унаследовавших древний (уральский) структурный рисунок [7].

Наиболее выраженными в регионе являются зоны активных разломов, формирующие фронтальную систему Кавказского орогена (в пределах исследуемого района), а также нарушения Эльбурс-Малокавказской складчато-надвиговой системы, расположенной к югу от района исследований и обрамляющей с юго-запада, юга и юго-востока бассейн Каспийского моря (обозначены, соответственно, цифрами 1 и 2 на рис. 2). В основной своей части эти системы нарушений отвечают высоким рангам достоверности, характеризуясь значительными скоростями относительных перемещений бортов разлома ( $>5$  и  $1-5$  мм/год) и высокой концентрацией деформаций внутри зон их динамического влияния [39, 40].

Меньшую роль играет система активных разломов общекавказского простирания в северной части Каспийского региона (цифра 3 на рис. 2 – вне пределов исследуемого района), приуроченная к осевой части Мангышлакско-Центрально-Устюртской зоны. Ее проявления оцениваются как менее достоверные (по сравнению с системами Кавказского орогена и Эльбурс-Малокавказской складчато-надвиговой

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

зоны), с относительно невысокими скоростями движений вдоль бортов разломов этой системы ( $<1$  мм/год).

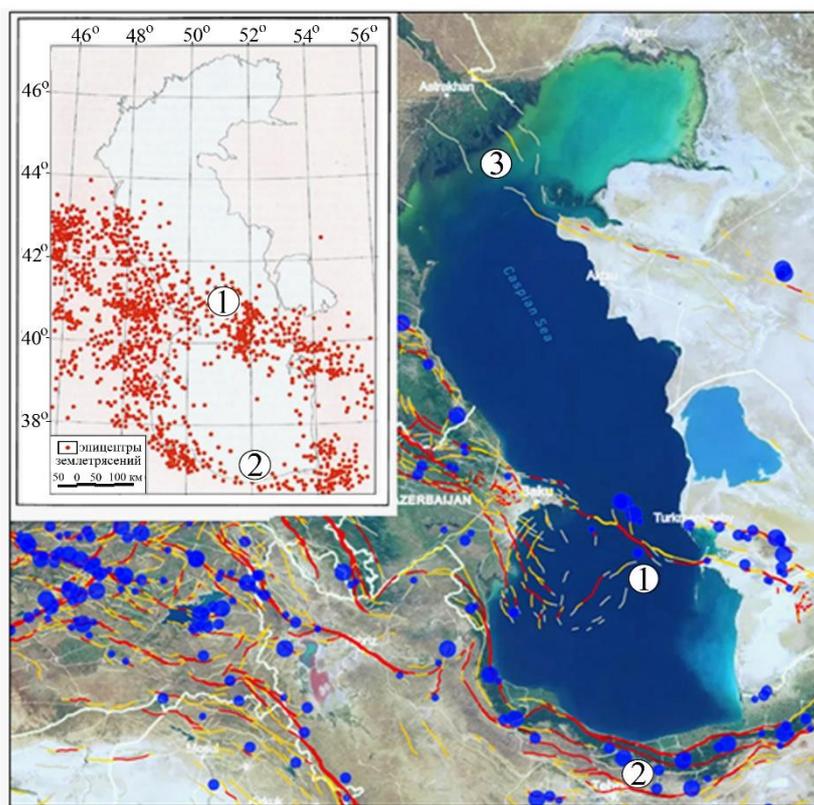


Рис. 2. Активные разломы (по [39, 40]) и сейсмичность (на врезке, по [7]) Каспийского региона. Цифрами обозначены основные системы разломов, контролирующие сейсмичность региона: 1 — Большекавказско-Копетдагская, 2 — Эльбурс-Малокавказская, 3 — Северо-Каспийская (Мангышлакско-Центрально-Устюртская).

Составлено авторами по [7, 39, 40].

Зоны субмеридионального (антикавказского) простираения, по мнению некоторых исследователей, «... соответствуют элементам трансорогенной системы деформаций, отражающей поперечные зоны сжатия и растяжения и сопутствующие им линеаменты» [7, стр. 98]. Подобные структуры характерны для всего Альпийско-Азиатского (от Альп до Тянь-Шаня и Гималаев) и других орогенных поясов.

**Сейсмичность Каспийского моря и прилегающих территорий** в основном контролируется зонами активных на современном этапе разноранговых разломов

западно-северо-западного (общекавказского) простираия и в меньшей степени – поперечными к ним разрывными нарушениями (рис. 2).

Наиболее протяженная зона высокой сейсмичности региона расположена вдоль фронтальной системы Кавказского орогена [7, 30]. Она приурочена к границе альпийского пояса и Скифско-Туранской плиты, протягиваясь от сооружений Большого Кавказа и сопряженного с ними Терско-Каспийского прогиба, вдоль Апшероно-Прибалханской зоны поднятий до Копетдага (цифра 1 на рис. 2). В тектоническом отношении эта зона (обозначенная нами как Большекавказско-Копетдагская) представлена системами надвигово-складчатых и (как показали результаты анализа фокальных механизмов землетрясений, о чем будет сказано ниже) сбросовых разрывных деформаций. Последнее положение согласуется с данными других исследователей [7 и др.] о наличии как взбросовых, так и флексурно-сбросовых структур в пределах зон, пересекающих Средний Каспий с запада-северо-запада на восток-юго-восток.

Остальные сейсмогенные зоны находятся вне пределов исследуемого района. Одна из них сопряжена со структурами Эльбурс-Малокавказской складчато-надвиговой системы (обозначена цифрой 2 на рис. 2). Она опоясывает с юга Южно-Каспийскую впадину, протягиваясь от Малого Кавказа вдоль орогенной зоны Эльбурса, изменяя на восточном фланге региона свое направление на северо-восточное, в сторону Копетдага, где она сопрягается с первой — Большекавказско-Копетдагской зоной. Активные разломы в пределах этой зоны имеют падение в северных румбах, при этом в юго-западном обрамлении Каспийского моря они имеют наклон в северо-северо-восточном направлении, в пределах юго-восточной его периферии – в северо-северо-западном направлении [31], то есть в сторону Южно-Каспийской впадины субокеанического типа с редуцированной земной корой.

Северный Каспий в сейсмическом отношении является относительно слабоактивным. В его пределах зафиксированы малочисленные землетрясения в пределах Мангышлакско-Центрально-Устюртской зоны разломов (цифра 3 на рис. 2), значительно уступающие и в количественном, и в энергетическом отношении основным сейсмогенным зонам региона. Следует добавить, что в пределах Северного Каспия отсутствуют очаги землетрясений, для которых была бы выполнена реконструкция фокальных механизмов.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕРМИНЫ

*Методологическую основу исследований* составил алгоритм одного из тектонофизических методов — структурно-кинематического [6, 8, 23], используемый применительно к данным о фокальных механизмах землетрясений. Этот алгоритм предполагает дифференциацию фокальных механизмов по типам деформационных режимов и по кинематическим обстановкам их формирования (разноориентированного регионального сжатия или растяжения) с последующим анализом пространственно-временного распределения землетрясений разных типов [5, 38]. При этом основные особенности регионального сейсмогенеза находят отражение:

- в многообразии *деформационных режимов* разрывообразования, идентифицированных в очагах анализируемых землетрясений;

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

---

- в разных *кинематических обстановках*, которые являются прямыми индикаторами неравновесного состояния данной геодинамической системы, отражая воздействие напряжений сжатия или растяжения в регионе и особенности ориентировок их главных осей относительно сторон света.

*На первом этапе* исследований для идентификации деформационных режимов в очагах использована классификация типов напряженного состояния геологической среды, в основу которой заложены соотношения углов наклона осей главных напряжений [6, 10, 23]. Прообразом этой классификации является положение Е. М. Андерсона о том, что для земной коры одно из главных нормальных напряжений, как правило, является субвертикальным, а два других – субгоризонтальными [37], обуславливая возникновение 3-х основных типов разрывных деформаций:

- взбросовых, когда субвертикальной является ось минимального сжатия (в фокальных механизмах — ось  $T$ ), обусловленных обстановками прямого (без сдвиговой составляющей) сжатия. Ось  $T$ , которая, строго говоря, является «осью максимального растяжения или минимального сжатия», в данном конкретном случае, т. е. в обстановках сжатия, занимая субвертикальное положение является только «осью минимального сжатия», поскольку в природе не существует сколько-нибудь значимых факторов, способных обеспечить растяжение массива в вертикальном направлении, в то время как литостатическое давление (обеспечивающее эффект сжатия в этом же — вертикальном — направлении) присутствует постоянно, возрастая с увеличением глубины.;

- сбросовых, при субвертикальном положении оси максимального сжатия (применительно к фокальным механизмам — оси  $P$ ), отражающих обстановки прямого (без сдвиговой составляющей) растяжения;

- сдвиговых — в случаях, когда вертикальное положение занимает промежуточная ось (ось  $N$ ).

Отвечающие этим типам деформаций, соответственно, взбросовой, сбросовой и сдвиговой деформационные режимы, рассматриваются как основные (по [6] — «идеальные»), а поля напряжений, обусловившие проявления данных режимов, отнесены к разряду *нетрансформированных* (или *первичных*), в отличие от *вторичных* (*трансформированных*) систем напряжений, способствующих возникновению комбинаторных деформационных режимов – взбросо-, сбросо-сдвигового и других [5]. В трансформированных полях напряжений наличие сдвиговой составляющей, обусловившей возникновение очагов сдвиго-взбросового и взбросо-сдвигового типов, свидетельствует о смене обстановок прямого сжатия обстановками косоугольного сжатия или *транспрессии*. Аналогично, наличие сдвиго-сбросовых и сбросо-сдвиговых фокальных механизмов указывает на воздействие полей напряжений, отвечающих условиям косоугольного растяжения или *транстенсии*.

Следует отметить, что ведущая роль первичных полей напряжений, обусловивших возникновение основных – взбросового, сбросового и сдвигового — деформационных режимов в процессе сейсмогенеза, подтверждается преобладанием фокальных механизмов землетрясений, идентифицированных в пределах Средиземноморского складчатого пояса. Так, из 1886 землетрясений (за период с 1976 г. по 2020 г.), для которых идентифицированы фокальные механизмы, более 80% очагов образовалось под

воздействием именно этих полей напряжений [5]. Указанные особенности сейсмогенного разрывообразования предопределены общим характером развития планеты — горизонтальными перемещениями литосферных плит, сочленяющихся по системам конвергентных и дивергентных границ, к которым приурочены основные сейсмогенные пояса Земли.

Таким образом, понятие регионального сжатия в общем виде включает кинематические обстановки как прямого сжатия (без существенной сдвиговой составляющей), так и обстановки косоугольного сжатия — транспрессии, в которых сдвиговая составляющая играет значительную роль. Аналогичным образом, региональное растяжение определяется совокупностью обстановок, которые идентифицируются как прямое растяжение (без сколько-нибудь значительной сдвиговой составляющей), так и косое растяжение или трансенсия.

Прямые индикаторы тех или иных кинематических обстановок сейсмогенеза являются структурно-кинематические типы очагов землетрясений, позволяя идентифицировать:

- обстановки регионального сжатия, устанавливаемые по наличию очагов взбросового типа, отвечающих условиям прямого сжатия, а также — взбросо-сдвигового и сдвиго-взбросового типов, соответствующих обстановкам косоугольного сжатия или транспрессии;

- обстановки регионального растяжения, которым соответствуют очаги сбросового типа, образующиеся в обстановках прямого растяжения, и сбросо-сдвиговые и сдвиго-сбросовые, формирование которых происходило в условиях косоугольного растяжения – трансенсии.

Определение кинематических обстановок формирования очагов сдвиговых типов по данному критерию затруднительно и требует дополнительных данных о геодинамике региона, поскольку возникновение их с кинематической точки зрения равновероятно как в условиях сжатия, так и при растяжении земной коры.

*Следующие (второй и третий) этапы исследований* включают процесс унификации тензоров сейсмогенерирующих полей напряжений для групп очагов, характеризующихся общностью кинематических обстановок и деформационных режимов. С этой целью фокальные механизмы, имеющие близкие значения параметров и соответствующие одному полю напряжений, в процессе обработки на стереограмме объединялись в *структурно-кинематические парагенезисы сейсмогенных разрывов и смещений* (далее — структурно-кинематические парагенезисы или парагенезисы). Количественное наполнение этих парагенезисов, отвечающих тем или иным кинематическим обстановкам и деформационным режимам, являлось одним из критериев ранжирования соответствующих групп фокальных механизмов по их роли в процессе регионального сейсмогенеза.

Однако количественные соотношения очагов землетрясений разных типов не в полной мере характеризуют особенности сейсмичности региона, поскольку в состав выборки, составляющих структурно-кинематические парагенезисы, включены события разного энергетического уровня. По этой причине в процесс сопоставительного анализа привнесён дополнительный универсальный показатель — приблизительное количество выделившейся сейсмической энергии (в  $\Sigma E \cdot 10^{12}$ , Дж или в величинах логарифма

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

---

суммарной энергии —  $Ig\Sigma E$ ) в очагах или в образуемых ими парагенезисах. Этот критерий, как будет показано ниже, более контрастно отражает особенности проявления разных кинематических обстановок и деформационных режимов в регионе.

Данный алгоритм обусловил последовательность решения комплекса задач, направленных на унификацию параметров фокальных механизмов разных структурно-кинематических типов, и на ранжирование (по степени значимости в общем процессе сейсмогенеза) образуемых ими совокупностей (парагенезисов), отвечающих разным кинематическим обстановкам.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАННЫХ

Как отмечалось выше, в качестве объекта для исследования кинематических обстановок сейсмогенеза выбрана наиболее протяженная и структурно выраженная Большекавказско-Копетдагская зона, которая приурочена к границе альпийского пояса и Скифско-Туранской плиты, разграничивая (в акваториальной части региона) области с земной корой континентального и субокеанического типов.

*Фактологической основой* исследований послужили выборки данных по фокальным механизмам из сейсмических каталогов, размещенных на сайтах Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра, Международного сейсмологического центра ISC, Global CMT Колумбийского университета и ФИЦ Единая геофизическая служба РАН [41, 42, 43, 44]. Также использованы данные о механизмах очагов, опубликованные в научной литературе [11, 12 и др.].

Объем анализируемой выборки составил 134 фокальных механизма. В нее вошли все идентифицированные очаги в широком энергетическом диапазоне: величины их магнитуд варьируются от 2.2 до 7.0. При этом большая их часть (73%) имеет значения  $M > 4.0$ ; половина (50% выборки) имеет магнитуды со значениями  $M \geq 5$  (табл. 1).

Очаги анализируемых землетрясений рассредоточены как в земной коре, так и в верхней мантии. Мелкофокусными, которые можно однозначно оценивать как коровые (с глубиной  $< 20$  км) являются 44 события. В интервалах 20-30 км образовалось 13 очагов, на глубинах 30–40 км — 25. Учитывая возможные погрешности определения глубины очага и наличие субокеанической коры редуцированной мощности, они могут рассматриваться как пограничные – нижнекоровые или верхнемантийные. Остальные 52 землетрясения (31 — с глубиной 40–50 км, 13 — с глубиной от 50 до 60 км и 8, сформированных на глубинах более 60 км) являются относительно глубокофокусными, локализованными в верхней мантии литосферы региона.

Результаты анализа фокальных механизмов показали, что отвечающие обстановкам регионального сжатия очаги взбросового, сдвиго-взбросового и взбросо-сдвигового типов преобладают в суммарном отношении: их общее количество составляет 58 событий (44% от исследуемой выборки). Также весьма распространены землетрясения, сформировавшиеся в обстановках регионального растяжения: очаги сбросового, сдвиго-сбросового и сбросо-сдвигового типов представлены 46 событиями (34% от общего количества).

Кроме того, выборка включает 30 (22%) сдвиговых очагов, 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, способные внести сколько-нибудь значительные коррективы в полученные (изложенные ниже) результаты, землетрясения данного типа в работе не анализировались.

Таблица 1.

Распределение идентифицированных механизмов очагов землетрясений региона по магнитудам и деформационным режимам

Обстановки Деформационные режимы	Магнитуды					Σ очагов (%)
	≤4.0	4.0–4.9	5.0–5.9	6.0–6.9	≥7.0	
<b>Региональное сжатие</b>						
Взбросовый	3	11	24	1	1	40
Взбросо-сдвиговый	4	1	2	1	–	8
Сдвиго-взбросовый	-	2	6	2	–	10
<i>Итого</i>	7	14	32	4	1	58 (44)
<b>Региональное растяжение</b>						
Сбросовый	8	7	7	3	–	25
Сдвиго-сбросовый	1	1	1	2	–	5
Сбросо-сдвиговый	5	4	6	1	–	16
<i>Итого</i>	14	12	14	6	-	46 (34)
<b>Региональное сжатие или растяжение</b>						
Сдвиговый	16	5	7	2	–	30 (22)
<i>Итого</i>						
<i>Всего: очагов (%)</i>	37 (27)	31 (23)	53 (40)	12 (9)	1 (1)	134

Составлено авторами.

#### 4. ДОМИНИРУЮЩИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ И КИНЕМАТИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ РЕГИОНАЛЬНОГО СЕЙСМОГЕНЕЗА

**Результаты идентификации доминирующих кинематических обстановок.** Анализ фокальных механизмов землетрясений Большекавказско-Копетдагской зоны показал, что их формирование происходило в условиях воздействия разнообразных полей тектонических напряжений, обусловивших многообразие проявлений регионального сейсмогенеза. В качестве индикаторов кинематических обстановок рассматривались деформационные режимы в очаге и ориентировки осей главных напряжений, отражающие направление действия сил сжатия или растяжения в регионе.

Для очагов, обусловленных обстановками прямого сжатия или транспрессии, направление действия структурообразующих напряжений определяется по ориентировке оси максимального сжатия ( $P$ ). Аналогичным образом, в обстановках прямого растяжения и транстенсии критерием определения кинематической обстановки являются направления оси максимального растяжения ( $T$ ). Соотношения

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

ориентировок этих осей в фокальных механизмах соответствующих типов приведены на розах-диаграммах, построенных не в относительном (в % соотношении), а в реальном (по количеству очагов) масштабе (рис. 3).

Характер распределения ориентировок осей  $P$ , отражающих направление регионального сжатия в очагах взбросового типа, показал, что значительное их количество (28 событий, в том числе, все землетрясения с  $M \geq 6.0$ ) локализовано в диапазоне ориентировок  $0-40^\circ$  с четко выраженным асимметричным максимумом в направлении  $10-20^\circ$  (на рис. 3а — затенено). Эта закономерность становится более очевидной в суммарном распределении осей сжатия во всех очагах, отвечающих обстановкам простого сжатия и транспрессии: в данном случае этому максимуму соответствуют значения параметров 41-го из 58-ми фокальных механизмов регионального сжатия (на рис. 3а — показаны контуром).

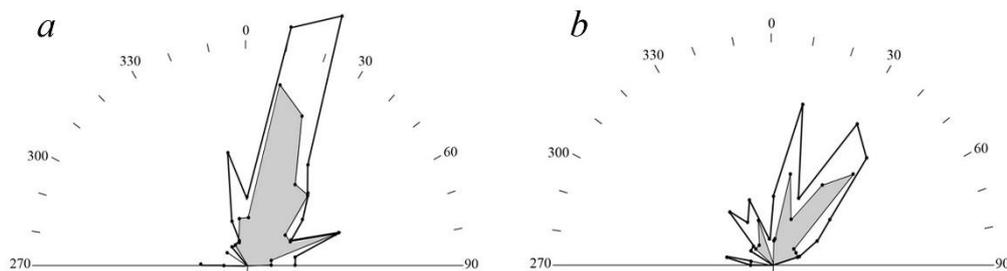


Рис. 3. Розы-диаграммы ориентировок осей максимального сжатия  $P$  (а) и растяжения  $T$  (б) в фокальных механизмах землетрясений, сформировавшихся в обстановках, соответственно, регионального сжатия и растяжения; контуром показаны все очаги данных обстановок, затенено — очаги только основных (взбросового и сбросового) типов.

Составлено авторами.

Ориентировки осей растяжения  $T$  в большинстве очагов сбросового типа (а именно — в 15-ти, включая все землетрясения с  $M \geq 6.0$ ) локализованы в том же диапазоне ориентировок, что и оси сжатия взбросовых очагов —  $10-40^\circ$ , образуя при этом два четко выраженных максимума в направлениях  $10^\circ$  и  $30-40^\circ$  (на рис. 3б — затенено). В суммарном распределении осей  $T$  в очагах сбросового, сбросо-сдвигового и сдвига-сбросового типов, отвечающих обстановкам простого растяжения и трансенсии, указанные максимумы выглядят еще более выразительно: им соответствуют параметры 27-ми из 46-ти очагов (на рис. 3б — показаны контуром).

Таким образом, контрастные (в диапазоне  $10-40^\circ$ ) максимумы в распределении ориентировок осей главных напряжений  $P$  и  $T$  (рис. 3), которые соответствуют большей части фокальных механизмов, показывают, что формирование регионального сейсмогенеза было обусловлено, главным образом, периодически сменяющимися друг друга (инверсионными) кинематическими обстановками сжатия и

растяжения, действующими в северо-северо-восточном–юго-юго-западном (близком к субмеридиональному) направлении.

Аналогичные кинематические обстановки северо-северо-восточного–юго-юго-западного сжатия и растяжения преобладают также в очагах землетрясений Средиземноморско-Гималайского пояса, в частности, в пределах его сегмента, протягивающегося от Пиренеев до Каспийского моря. Так, согласно данным каталога фокальных механизмов, размещенного на сайтах [42, 43], максимум ориентировок субгоризонтальных осей сжатия  $P$  в фокальных механизмах 464-ти взбросовых землетрясений составляет  $24^\circ$ , а максимум осей растяжения  $T$  в очагах 557-ми землетрясений сбросового типа ориентирован в направлении  $19^\circ$  [5].

**Количественно-энергетические характеристики совокупностей очагов, сформировавшихся в инверсионных кинематических обстановках.**

Основные выводы о доминировании инверсионных кинематических обстановок в процессе сейсмогенеза, а также положения относительно ведущей роли первичных (нетрансформированных) систем напряжений и соответствующих им деформационных режимов, подтверждаются соотношениями количества очагов ( $N$ ,  $N\%$ ) и суммарной выделившейся сейсмической энергии ( $\Sigma E \cdot 10^{12}$  Дж,  $\Sigma E, \%$ ,  $\lg \Sigma E$ ) в совокупностях очагов разных типов (табл. 2).

Таблица 2.

Соотношения количества очагов и суммарной выделившейся сейсмической энергии (в том числе — в % от всего объема анализируемой выборки) в совокупностях фокальных механизмов, сформированных в инверсионных обстановках северо-северо-восточного–юго-юго-западного сжатия и растяжения

Обстановка Тип очага	N (очагов)	N (%)	$\Sigma E$ ( $10^{12}$ Дж)	$\lg \Sigma E$	% $\Sigma E$ от энергии всей выборки
<b>Сжатие</b>					
Взбросовый	28	21	42199	16.625	53
Сдвиго-взбросовый	8	6	3849	15.585	5
Взбросо-сдвиговый	5	4	16	13.192	<<1
<b>Итого</b>	<b>41</b>	<b>31</b>	<b>46064</b>	<b>16.663</b>	<b>58</b>
<b>Растяжение</b>					
Сбросовый	15	11	11631	16.066	15
Сдвиго-сбросовый	3	2	8325	15.920	10
Сбросо-сдвиговый	9	7	190	14.279	<<1
<b>Итого</b>	<b>27</b>	<b>20</b>	<b>20146</b>	<b>16,304</b>	<b>25</b>
<b>Всего</b>	<b>68</b>	<b>51</b>	<b>66210</b>		<b>83</b>

Составлено авторами.

Результаты анализа приведенных данных показывают, что:

1. Доминирующая роль инверсионных обстановок северо-северо-восточного–юго-юго-западного сжатия и растяжения в пределах Среднекаспийского региона нашла отражение в суммарном количестве очагов (68 или 51% от объема всей

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

исследуемой выборки) и особенно в их энергетическом наполнении: в этих очагах была выделена наибольшая часть сейсмической энергии региона ( $66210 \cdot 10^{12}$  Дж или 83% от общего количества).

2. Непосредственно в инверсионном процессе наиболее значимыми являются обстановки сжатия, показатели которых более чем в два раза превышают аналогичные характеристики обстановок растяжения. Так, при сжатии в 41-м очаге (31%) суммарная величина выделившейся сейсмической составила  $46064 \cdot 10^{12}$  Дж или ~58% от количества энергии, выделившейся в 134-х очагах анализируемой выборки, тогда как в условиях растяжения было сформировано 27 очагов (20%), в которых выделилось  $20146 \cdot 10^{12}$  Дж (~25% от общего количества).

3. При этом следует отметить ведущую роль первичных систем напряжений, обусловивших возникновение очагов основных — взбросового и сбросового — деформационных режимов, количественные характеристики которых составляют, соответственно, 28 (21%) и 15 (11%) событий, а также — 53% и 15% суммарной выделившейся сейсмической энергии от всего объема анализируемой выборки.

### 5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ ИНВЕРСИОННЫХ ОБСТАНОВОК

*Пространственное положение и стереографические модели проявлений сейсмогенеза инверсионных обстановок.* Как было отмечено, очаги землетрясений, формирование которых происходило в инверсионных обстановках, локализованы в пределах Большекавказско-Копетдагской зоны общекавказского простирания (рис. 4). Эта зона трассируется с Кавказа (от Азербайджана, Дагестана) на северо-западе до Туркменистана на юго-востоке, пересекая Каспийское море вдоль Апшеронско-Прибалханской зоны поднятий, разграничивающей Средне-Каспийскую и Южно-Каспийскую впадины. В тектоническом отношении эта область представляет собой зону сочленения гетерогенного (герцинского, раннекиммерийского) основания Скифско-Туранской плиты и альпийской складчато-покровной системы Большого Кавказа–Копетдага [7, 18, 24, 25, 26, 29], где сконцентрировано наибольшее количество активных разрывных структур (рис. 2), имеющих преимущественно общекавказское простирание [39, 40].

Близкие значения параметров фокальных механизмов очагов Большекавказско-Копетдагской зоны, обусловленных попеременно действующими в направлении 10–40° напряжениями сжатия и растяжения, позволили построить стереографические модели сейсмогенеза, соответствующие этим обстановкам (рис. 5). Модели аппроксимируют параметры фокальных механизмов основных — взбросового и сбросового — типов. К построению не привлекались очаги, сформированные в условиях «косого» сжатия и растяжения (транспрессии и трансенсии), поскольку они имеют значительный разброс значений всех параметров за исключением основного — ориентировок осей  $P$  и  $T$ .

Первая модель, аппроксимирующая параметры 28-и очагов взбросового типа (рис. 5а), 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° – азимут и угол

падения). Нодальные плоскости ( $NP1$  и  $NP2$ ), отражающие вероятное положение сейсмогенных разрывов в очагах, имеют общекавказское ( $286^\circ$ ) простирание. При этом одна из них ( $NP1$ ) в структурно-кинематическом отношении идентифицируется как взброс, имеющий наклон в южных румбах под углом  $48^\circ$ , вторая ( $NP2$ ) — как надвиг, падающий под углом  $42^\circ$  в северном направлении.

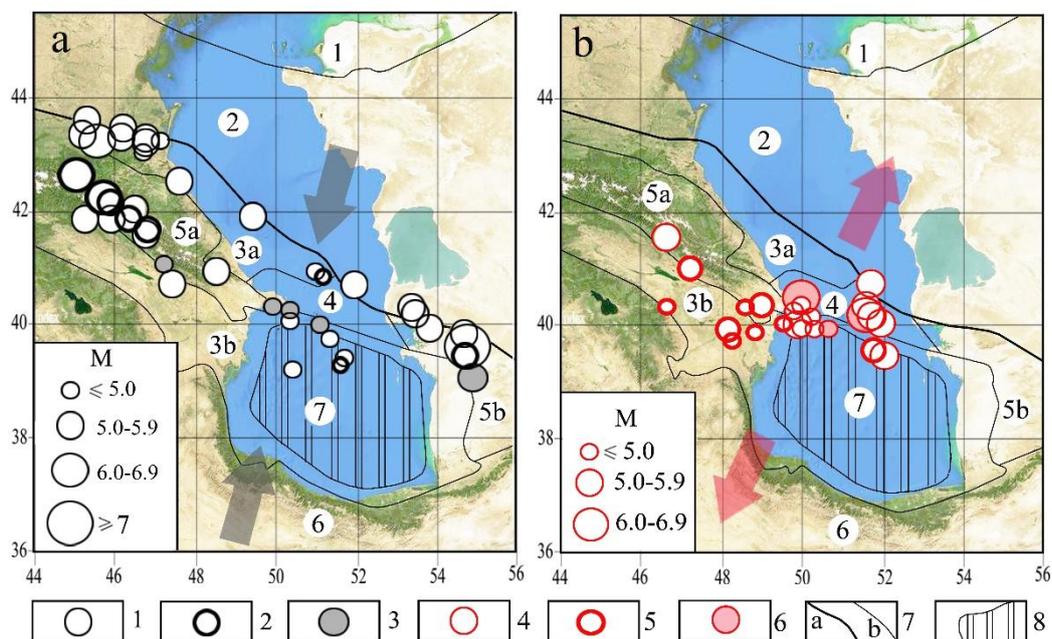


Рис. 4. Схемы размещения очагов землетрясений Большекавказско-Копетдагской зоны, сформированных в обстановках северо-северо-восточного сжатия (а) и растяжения (б). Условные обозначения: 1–3 — очаги взбросового (1), сдвига-взбросового (2) и взбросо-сдвигового (3) типов; 4–6 — очаги сбросового (4), сбросо-сдвигового (5) и сдвига-сбросового (6) типов; 7 — границы (а — между платформенными и складчатыми областями, б — между геоструктурами); 8 — кора субокеанического типа. На врезках — магнитуды в очаге; цифрами обозначены: 1–2 — платформенные области: Восточно-Европейская платформа (1), Скифско-Туранская плита (2); 3 — Терско-Каспийский передовой прогиб (3а) и межгорная Куринская впадина (3б); 4 — Апшероно-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).

Составлено авторами.

Учитывая общую тенденцию уменьшения глубин очагов в направлении с юга на север, можно полагать, что положению реальных сейсмогенных разрывов в большей

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

мере соответствует нодальная плоскость  $NP2$ . В структурном отношении это вполне отвечает геодинамической модели Большого Кавказа, построенной на основе реологической стратификации литосферы [28].

Вторая стереографическая модель аппроксимирует значения параметров 15-ти фокальных механизмов сбросового типа (рис. 5б), отражающих обстановку юго-юго-западного–северо-северо-восточного горизонтального растяжения с ориентировкой оси  $T$  в направлении  $208/0^\circ$  ( $28/0^\circ$ ) 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 (западно-северо-западное) простирание ( $292$ – $298^\circ$ ), однако в структурно-кинематическом отношении идентифицируется как сбросы, имеющие наклон в противоположных направлениях под углами  $44$ – $45^\circ$ .

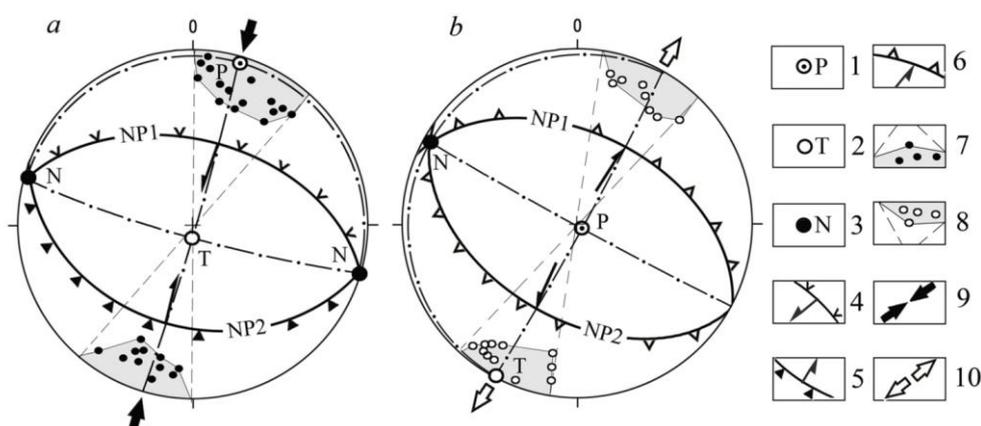


Рис. 5. Стереографические модели сейсмогенеза взбросового (а) и сбросового (б) типов для обстановок, соответственно, северо-северо-восточного сжатия и растяжения. Условные обозначения: 1–3 — проекции осей главных напряжений в моделях сейсмогенеза (1 — максимального сжатия, 2 — максимального растяжения, 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).

Сопоставление стереографических моделей регионального сейсмогенеза взбросового (рис. 5а) и сбросового (рис. 5б) типов, являющихся антиподами, указывает на практически полное совпадение границ секторов, соответственно, сжатия и растяжения в этих моделях. При этом угол между ориентировками осей главных напряжений  $P$  и  $T$  в моделях составляет всего  $11^\circ$ , отражая противоположный характер напряженного состояния геологической среды при формировании землетрясений указанных типов.

Таким образом, основные кинематические обстановки, обусловившие формирование большей части землетрясений Среднекаспийского региона, отражают воздействие попеременно действующих напряжений юго-юго-западного–северо-северо-восточного 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). Подобные изменения в процессах регионального сейсмогенеза ранее получили отражение в работах [3, 4, 5]. Также отмечалось, что 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, образующиеся в обстановках сжатия, будет представлена относительно пологими надвигами [5].

**Особенности проявления инверсионных обстановок сейсмогенеза во времени и по отношению к основным геоструктурам региона.** Исследованы следующие аспекты инверсионного процесса в регионе:

1. Продолжительность действия каждой из инверсионных обстановок и длительность разделяющих их интервалов.

2. Особенности пространственного распределения этих землетрясений по отношению к основным геоструктурам региона.

Ниже эти аспекты рассмотрены в той же последовательности.

1. Особенности изменений во времени напряжённо-деформированного состояния геологической среды и, соответственно, кинематических обстановок сейсмогенеза, отражает сравнительная хронограмма ориентировок осей напряжений в очагах, образовавшихся в противоположных обстановках — сжатия и растяжения (рис. 6). Хронограмма позволяет оценить как продолжительность периодов непрерывного действия каждой обстановки, так и длительность интервалов, разделяющих проявления этих обстановок. На ней приведены все очаги, отвечающие обстановкам юго-юго-западного–северо-северо-восточного 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 3.

Кратковременность периодов проявления каждой из инверсионных обстановок сейсмогенеза, равно, как и длительность интервалов, разделяющих проявления этих обстановок, обоснована сравнительными диаграммами, приведенными на рис. 7. Указанные временные параметры коррелируются между собой, имея максимумы протяженности от 0 до 5 и от 5 до 10 месяцев. Это свидетельствует о том, что временной интервал между проявлениями противоположных кинематических

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

обстановок, так же как и длительность периодов проявления той или иной обстановки, большей частью, составляют менее 1-го года.

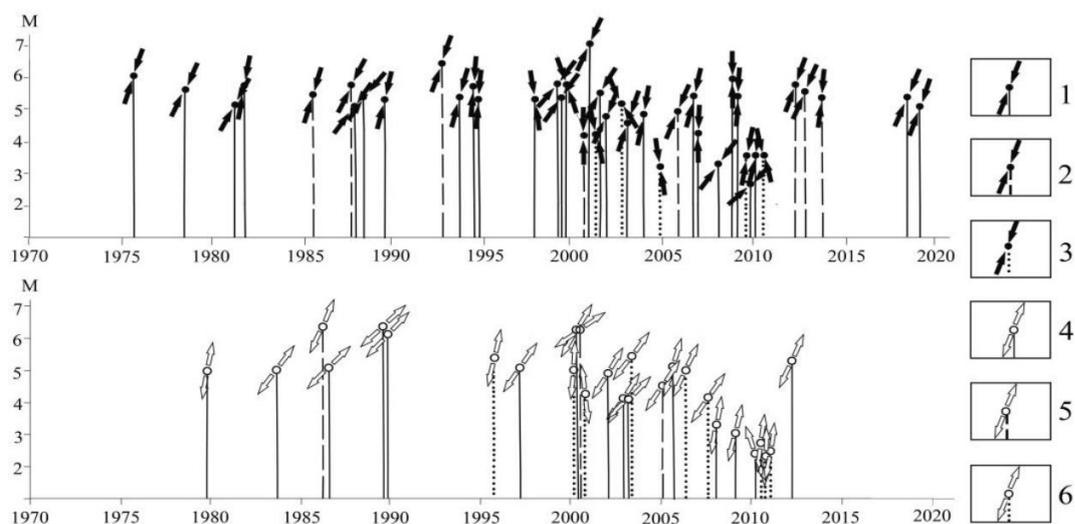


Рис. 6. Хронограмма проявления кинематических обстановок сейсмогенеза северо-северо-восточного сжатия (вверху) и растяжения (внизу) в пределах Среднекаспийского региона. Условные обозначения: 1–3 — очаги, сформированные в обстановках сжатия (1 — взбросового, 2 — сдвиго-взбросового, 3 — взбросо-сдвигового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

Составлено авторами.

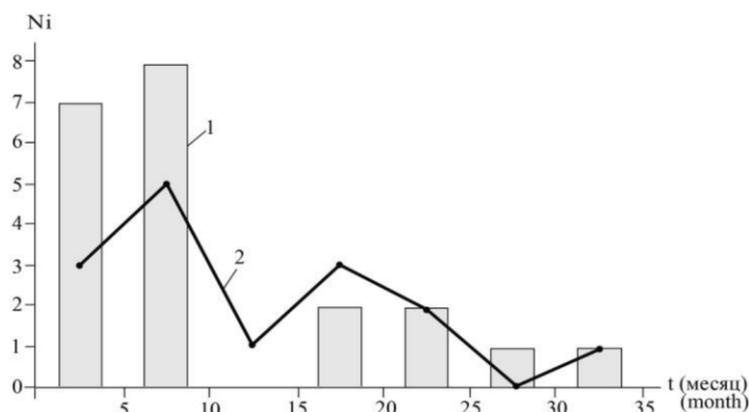


Рис. 7. Временные интервалы между проявлениями обстановок преимущественного сжатия и растяжения (1) и продолжительность действия этих обстановок (2).

Составлено авторами.

2. Как указано выше, исследуемые землетрясения локализованы в пределах Большекавказско-Копетдагской зоны, разграничивающей в акваториальной части Средне- и Южно-Каспийскую впадины, основание последней из которых представлено корой субокеанического типа. При этом устанавливается поперечная (к простиранию этой геоструктуры) зональность, выраженная количественно-энергетическими соотношениями очагов разных типов, отвечающих каждой из инверсионных обстановок.

Так, в пределах суши, а именно, в районах Большого Кавказа и Копетдага, сконцентрированы, 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. 4а). В то же время, большинство землетрясений (в том числе наиболее интенсивных, с высокими магнитудами), 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. 4б).

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 целлючисленными значениями меридианов (то есть, с шагом  $1^\circ$ ), приведены на рисунке 8.

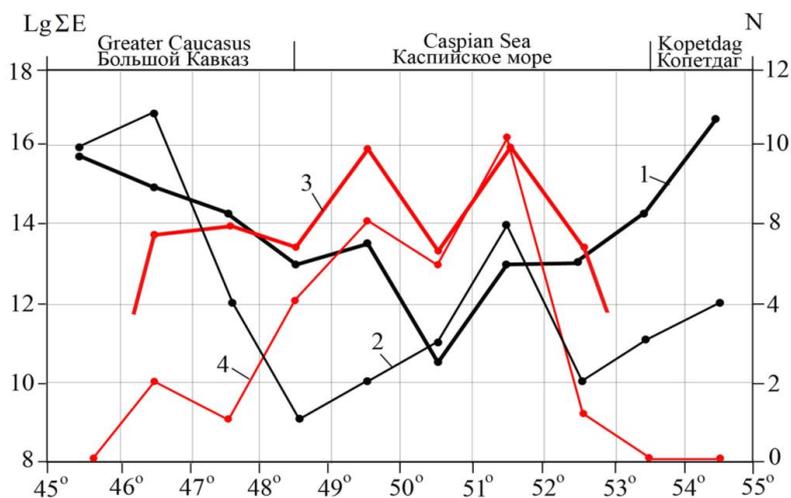


Рис. 8. Распределение (с запада на восток) величин логарифма суммарной выделенной энергии ( $\lg\Sigma E$ ) и количества землетрясений ( $N$ ) в очагах сжатия (1, 2) и растяжения (3, 4).

Составлено авторами.

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

---

Эти графики отражают существенное уменьшение количества очагов, сформированных в обстановках сжатия, и выделившейся в них сейсмической энергии, по направлению к Каспийскому морю как со стороны Большого Кавказа, так и со стороны Копетдага. Поскольку обстановки сжатия (в том числе, транспрессии) в количественном и энергетическом отношении являются доминирующими в пределах континентальной части региона, соответствующие им очаги являются прямыми индикаторами процессов орогенеза, взбросо- и надвигообразования, активно и повсеместно проявляющихся в районах Большого Кавказа и 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, разграничивающей области с корой континентального и субокеанического типа (рис. 8). При этом на краях профиля, на удалении от акваториальной части, очаги, образованные в обстановках растяжения, отсутствуют. Местонахождение, количество и энергетические характеристики очагов растяжения (транстенсии) является прямым указанием на продолжающиеся в настоящее время процессы деструкции коры в северном борту котловины с корой субокеанического типа — Южно-Каспийской впадины.

Добавим, что современные процессы деструкции земной коры и верхней мантии в бортовых частях впадин субокеанического типа, по-видимому, имеют весьма широкое проявление в пределах внутренних морских бассейнов Средиземноморского пояса. Так, в Крымско-Черноморском регионе вдоль северной периферии Западно-Черноморской и, особенно, Восточно-Черноморской впадин локализовано несколько очагов землетрясений, сформировавшихся в обстановках разнонаправленного растяжения, действующего в направлении, перпендикулярном береговой линии и континентальному склону [5]. К их числу относится и самое сильное в Крыму за последние 100 лет разрушительное Ялтинское землетрясение 11 сентября 1927 г. с магнитудой  $M_w=6.9$  [20].

### ВЫВОДЫ

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

1. Формирование регионального сейсмогенеза было обусловлено, главным образом, периодически сменяющимися друг друга инверсионными кинематическими обстановками сжатия и растяжения, действующими в северо-северо-восточном–юго-юго-западном (близком к меридиональному) направлении. При этом кардинальные изменения обстановок происходили, большей частью, в течение коротких (менее 1-го года) временных интервалов.

2. Обстановки сжатия (в том числе, транспрессии) в количественном и энергетическом отношении являются доминирующими: соответствующие им очаги землетрясений локализованы, в основном, в континентальной части региона. Они являются прямыми индикаторами процессов орогенеза, взбросо- и

надвигообразования, активно и повсеместно проявляющихся в районах Большого Кавказа и Копетдага.

3. В меньшей мере проявились противоположные обстановки — растяжения (транстенсии) коры в северо-северо-восточном–юго-юго-западном направлении. Очаги землетрясений, обусловленные этими обстановками, сосредоточены, большей частью, в акватории Каспийского моря — на границе областей с земной корой континентального и субокеанического типа, где они в количественном и энергетическом отношении превалируют над очагами, сформировавшимися в условиях регионального сжатия. Местонахождение, количество и энергетические характеристики очагов растяжения (транстенсии) являются прямым указанием на продолжающиеся в настоящее время процессы деструкции земной коры и верхней мантии в северном борту котловины с корой субокеанического типа — Южно-Каспийской впадины.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

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

#### Список литературы

1. Арабаджи М.С., Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С. Литосфера Каспийского региона / Геофизические параметры литосферы южного сектора Альпийского орогена. К.: Наукова думка, 1996. С. 179–188.
2. Волож Ю.А., Антипов М.П., Леонов Ю.Г. и др. Строеие кряжа Карпинского // Геотектоника. 1999. № 1. С. 28–43.
3. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я. Инверсии сейсмогенерирующих полей напряжений как проявление геодинамической нестабильности Крымско-Черноморского региона // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2022. Т.8 (74). №4. С. 207–218.
4. Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я. Некоторые особенности сеймотектоники Каспийского региона // Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том XIV. М.: ИИЕТ РАН, 2024. С. 228–233.
5. 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.
6. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: «Феникс», 2005. 572 с.
7. Глумов И.Ф., Маловицкий Я.П., Новиков А.А., Сенин Б.В. Региональная геология и нефтегазоносность Каспийского моря. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. 342 с.
8. Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука. 1979. С. 7–25.
9. Гущенко О.И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 26–51.
10. 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.
11. Етирмишли Г.Д., Казымова С.Э., Исмаилова С.С., Казымов И.Э. Современная геодинамика и сейсмичность Азербайджанского сектора Каспийского моря /SOCAR Proceedings, no.4(2022). С.

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

008–016.

12. Заманова А.Г. Структура субдукционной зоны Южно-Каспийской впадины и сейсмичность // Геофизический журнал. 2014. Т. 36. № 6. С. 188–196.
13. Короновский Н.В., Панина Л.В., Михайлов В.О. и др. Терско-Каспийский передовой прогиб: история формирования и современный структурный рисунок // Тектоника и магматизм Восточно-Европейской платформы. М.: Фонд «Наука России», Гео-инвэкс, 1994. С. 64–84.
14. Краснопевцева Г.В. Глубинное строение Кавказского региона // Геофизические параметры литосферы южного сектора Альпийского орогена. Киев: Наукова думка, 1996. С. 151–178.
15. Лебедев Л.И. Геоструктурные элементы Каспийского моря, их соотношение и условия формирования / Каспийское море: геология и нефтегазоносность. М.: Наука, 1987. С. 162–222.
16. Леонов Ю.Г., Гущенко О.И., Копп М.Л., Расцветаев Л.М. Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе Альпийского пояса и в его северном платформенном обрамлении // Геотектоника. 2001. № 1. С. 36–59.
17. Лиленберг Д.А. Новые подходы к оценке современной эндодинамики Каспийского региона и вопросы ее мониторинга / Изв. АН. Сер. географ. 1994. № 2. С. –36.
18. Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления. Масштаб 1:2500000. Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН. Объяснительная записка / под ред. В.Е. Хаина, Н.А. Богданова. М.: Научный мир, 2003. 120 с.
19. Нариманов Н.Р. Тектоническое районирование акватории Южно-Каспийской мегавпадины // Геология нефти и газа. 1992. № 11. С. 12–22.
20. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Горячун А.В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. Киев: Наук. думка, 1989. 192 с.
21. 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.
22. 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.
23. Ребецкий Ю.Л., Сим Л.А., Маринин А.В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.
24. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики // Геология и геофизика Юга России. 2019. Т. 9(3). С. 77–93.
25. Сенин Б.В., Шайнуров Р.В., Устьянцев В.Л. Структурная геология Северного и Среднего Каспия на основе геологической интерпретации геофизических данных // International Conf. On Petroleum Geol. And Hydrocarbon Potential of the Caspian and Black Sea Region. Baku: Azerbaijan. Abstracts Book. Azerb. Society of Petr. Geol., 2002; V712, pp.1–4.
26. 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.
27. 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.
28. 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. 6–22.
29. 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.
30. Уломов В.И., Полякова Т.П., Медведева Н.С. Динамика сейсмичности бассейна Каспийского моря // Физика земли. 1999. № 1. С. 76–82.
31. Хортов А.В., Шлезингер А.Е., Юров Ю.Г. Строение Южно-Каспийского глубоководного бассейна по данным сейсмических исследований и перспективы нефтегазоносности его глубинных недр // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. 1998, № 9. С. 2–7.
32. Шебалин Н.В., Ибрагимов Р. Н., Чернов Ю.К. и др. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. /Ред.

- В.И. Уломов, И.В. Шебалин, С.С. Арефьев, Г.Ю. Азимов, Р.П. Фемина. Ташкент: Фан, 1986. 368 с.
33. Шолпо В.Н. Альпийская геодинамика Большого Кавказа. М.: Недра, 1978. 176 с.
  34. Щукин, Ю.К. Атлас глубинного строения очаговых зон землетрясений / Ю.К. Щукин, Н.В. Шебалин; отв. ред. А.А. Маловичко. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. 102 с.
  35. Юнга С.Л. Сейсмотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии // Физика Земли. 1996. №12. С. 37–58.
  36. Якобсон А.Н. Литосфера Южного Каспия. Томографическая модель // Отечественная геология. 2002. № 2. С. 54–64.
  37. Anderson E.M. The dynamics of faulting. Trans. Edinburgh, Geol. 1951. Sec (8), pp. 387–402.
  38. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. Selective Manifestation of Sismogenic 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.
  39. 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.
  40. Сайт База данных активных разломов Евразии и прилегающих акваторий (AFEAD). [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database\\_map.html](http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html) (дата обращения 06.05.2025).
  41. Сайт Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC). [Электронный ресурс] Режим доступа: [emsc-csem.org](https://emsc-csem.org) (дата обращения 08.04.2025).
  42. Сайт Международного сейсмологического центра (ISC). [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin> (дата обращения 20.01.2025).
  43. Сайт Сейсмологический каталог Колумбийского университета. [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (дата обращения 20.01.2022)
  44. Сайт ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН». [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info\\_quake.pl](http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl) (дата обращения 29.05.2025).

## KINEMATICS OF SEISMOGENESIS OF THE MIDDLE CASPIAN REGION.

### Article 1. DOMINANT SITUATIONS AND THE INVERSION NATURE OF THEIR MANIFESTATIONS

Volfman Yu. M.<sup>1</sup>, Kolesnikova E. Ya.<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation  
E-mail: <sup>1</sup>[seism.volf@gmail.com](mailto:seism.volf@gmail.com)

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 inversions of the seismogenesis process of the Middle Caspian region caused by periodically acting dominant stresses of south-south-west–north-north-east compression and stretching are investigated in the work. The research area covers the central part of the Caspian Sea and the neighboring territories of the Caucasus and Kopetdag. It is characterized by a complex geological structure, active geodynamics and a high level of seismicity. Large geostructural elements are involved in the structure of the region: the southeastern margin of the ancient East-European platform, the young (Epihercine) Scythian-Turanian plate and the structures of the Alpine orogenic folded belt: the cover-thrust systems of the Greater Caucasus and Kopetdag, as well as adjacent

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

---

advanced troughs and intermountain depressions. The structure of the earth's crust and the seismicity of the region are determined by the fault systems of two main directions — west-north-west (pan-caucasian) and east-north-east (anti-caucasian). The object of the study was the Greater Caucasus-Kopetdag zone of high seismic activity, located along the border of the Alpine belt and the Scythian-Turanian plate. It divides (in the aquatic part of the region) areas with the earth's crust of the continental and suboceanic types. The research methodology is based on an algorithm for kinematic analysis of data on the focal mechanisms of earthquakes. This algorithm assumes the division of all earthquake foci into structural-kinematic parageneses — groups of focal mechanisms with similar values of the main parameters. The kinematic conditions of their compression and stretching formation (including transpression and transtension) have been identified, and the features of their spatial and temporal distribution have been investigated. At the same time, the number of foci of one type or another was taken into account, as well as the amount of released seismic energy in these foci or in the parageneses formed by them. 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 regional catalogs. As a result of the conducted research, the inversion character of the kinematic conditions of regional seismogenesis is substantiated under the influence of periodically acting compressive and tensile stresses (transpression and transtension) in the south-southwest–north-northeast direction. Stereographic models of the seismogenesis of these environments are constructed. The features of the manifestation of inversion conditions of seismogenesis in time, as well as in different (main) geostructures of the region, are investigated. It is shown that the inversion changes occurred over short (less than 1 year) time intervals. It has been established that the inversion conditions of regional compression (transpression) are dominant in quantitative and energetic terms: 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 somewhat lesser extent, stretching (transtension) situations are distinguished in quantitative and energetic terms. They are found in earthquake foci and their parageneses, concentrated mainly within 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 processes of destruction in the northern side of a basin with a suboceanic type crust – the South Caspian Depression.

*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.*

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

### References

1. Arabadzhi M.S., Vol'vovskij B.S., Vol'vovskij I.S. Litosfera Kaspiskogo regiona (Lithosphere of the Caspian region) Geofizicheskie parametry litosfery yuzhnogo sektora Al'pijskogo orogena. K.: Naukova dumka, 1996, pp. 179–188 (in Russian).
2. Volozh Yu.A., Antipov M.P., Leonov Yu.G. i dr. Stroenie kryazha Karpinskogo (The structure of the Karpinsky ridge). Geotektonika. 1999, no. 1, pp. 28–43 (in Russian).

3. Vol'fman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Inversii sejsmogeneriruyushchih polej napryazhenij kak proyavlenie geodinamicheskoy nestabil'nosti Krymsko-Chernomorskogo regiona (Inversions of seismogenic stress fields as a manifestation of geodynamic instability of the Crimean-Black Sea region). *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2022, vol. 8(74), no. 4, pp. 207–218 (in Russian).
4. Vol'fman Yu.M., Kolesnikova E.Ya. Nekotorye osobennosti sejsmotektoniki Kaspijskogo regiona (Some features of seismotectonics of the Caspian region) *Sovremennye problemy geologii, geofiziki i geoekologii Severnogo Kavkaza*. Vol. XIV. M.: IJET RAN, 2024, pp. 228–233 (in Russian).
5. Vol'fman Yu.M., Pustovitenko B.G., Kolesnikova E.Ya. Novye rezul'taty tektonofizicheskogo analiza fokal'nyh mekhanizmov zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (New results of tectonophysical analysis of focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2022, vol. 8(74), no. 4, pp. 162–206 (in Russian).
6. Gintov O.B. Polevaya tektonofizika i ee primenenie pri izuchenii deformacij zemnoj kory Ukrainy (Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the earth's crust of Ukraine). Kiev: «Feniks», 2005, 572 p. (in Russian).
7. Glumov I.F., Malovickij Ya.P., Novikov A.A., Senin B.V. Regional'naya geologiya i neftegazonosnost' Kaspijskogo moray (Regional geology and oil and gas potential of the Caspian Sea). M.: OOO «Nedra-Biznescentr», 2004, 342 p. (in Russian).
8. Gushchenko O.I. Metod kinemacheskogo analiza struktur razrusheniya pri rekonstrukcii polej tektonicheskikh napryazhenij. Polya napryazhenij i deformacij v litosfere (Method of kinematic analysis of fracture structures in the reconstruction of tectonic stress fields. Stress and strain fields in the lithosphere). M.: Nauka, 1979, pp. 7–25 (in Russian).
9. Gushchenko O.I. Rekonstrukciya polya megaregional'nyh tektonicheskikh napryazhenij sejsmoaktivnyh oblastej Evrazii. Polya napryazhenij i deformacij v litosfere (Reconstruction of the field of megaregional tectonic stresses of seismically active regions of Eurasia. Stress and deformation fields in the lithosphere) M.: Nauka, 1979, pp. 26–51 (in Russian).
10. Gushchenko O.I., Mostryukov A.O., Petrov V.A. Struktura polya sovremennogo regional'nogo napryazheniya sejsmoaktivnyh zon zemnoj kory vostochnoj chasti Sredizemnomorskogo aktivnogo poyasa (Structure of the field of modern regional stress of seismically active zones of the earth's crust of the eastern part of the Mediterranean active belt). *Dokl. AN SSSR*, 1991, 312, no. 4, pp. 830–835 (in Russian).
11. Etirmishli G.D., Kazymova S.E., Ismailova S.S., Kazymov I.E. Sovremennaya geodinamika i sejsmichnost' Azerbajdzhanskogo sektora Kaspijskogo morya (Modern geodynamics and seismicity of the Azerbaijan sector of the Caspian Sea). *SOCAR Proceedings*, no. 4(2022), pp. 008–016 (in Russian).
12. Zamanova A.G. Struktura subdukcionnoj zony Yuzhno-Kaspijskoj vpadiny i sejsmichnost' (The structure of the subduction zone of the South Caspian Basin and seismicity). *Geofizicheskij zhurnal*, 2014, v. 36. no. 6, pp. 188–196 (in Russian).
13. Koronovskij N.V., Panina L.V., Mihajlov V.O. i dr. Tersko-Kaspijskij peredovoj progib: istoriya formirovaniya i sovremennyy strukturnyj risunok. Tektonika i magmatizm Vostochno-Evropejskoj platformy (Tersko-Caspian foredeep: history of formation and modern structural pattern. Tectonics and magmatism of the East European platform) M.: Fond «Nauka Rossii», Geo-inveks, 1994, pp. 64–84 (in Russian).
14. Krasnopeceva G.V. Glubinnoe stroenie Kavkazskogo regiona. Geofizicheskie parametry litosfery yuzhnogo sektora Al'pijskogo orogena (Deep structure of the Caucasus region. Geophysical parameters of the lithosphere of the southern sector of the Alpine orogen). Kiev: Naukova dumka, 1996, pp. 151–178 (in Russian).
15. Lebedev L.I. Geostrukturnye elementy Kaspijskogo morya, ih sootnoshenie i usloviya formirovaniya. Kaspijskoe more: geologiya i neftegazonosnost' (Geostructural elements of the Caspian Sea, their relationship and conditions of formation. Caspian Sea: geology and oil and gas potential). M.: Nauka, 1987. pp. 162–222 (in Russian).
16. Leonov Yu.G., Gushchenko O.I., Kopp M.L., Rascvetaev L.M. Vzaimosvyaz' pozdnokajnozoijskikh napryazhenij i deformacij v Kavkazskom sektore Al'pijskogo poyasa i v ego severnom platformennom obramlenii (The relationship of late Cainozoic stresses and deformations in the Caucasian sector of the Alpine belt and in its northern platform framing). *Geotektonika*, 2001, no. 1, pp. 36–59.

## ДОМИНИРУЮЩИЕ ОБСТАНОВКИ И ИНВЕРСИОННЫЙ ХАРАКТЕР ИХ ПРОЯВЛЕНИЙ

---

17. Lilienberg D.A. Novye podhody k ocenke sovremennoj endodipamiki Kaspijskogo regiona i voprosy ee monitoringa (New approaches to assessing modern endodipamics of the Caspian region and issues of its monitoring) *Izv. AN. Ser. geograf.*, 1994, no. 2, pp. 36 (in Russian).
18. Mezhdunarodnaya tektonicheskaya karta Kaspijskogo morya i ego obramleniya. Masshtab 1:2500000. Institut litosfery okrainnyh i vnutrennih morej RAN. Ob"yasitel'naya zapiska pod red. V.E. Haina, N.A. Bogdanova (International tectonic map of the Caspian Sea and its framing. Scale 1:2500000. Institute of Lithosphere of Marginal and Inland Seas of the Russian Academy of Sciences. Explanatory note / edited by V.E. Khain, N.A. Bogdanov). M.: Nauchnyj mir, 2003, 120 p. (in Russian).
19. Narimanov N.R. Tektonicheskoe rajonirovanie akvatorii Yuzhno-Kaspijskoj megavpadipy (Tectonic zoning of the water area of the South Caspian megadepression). *Geologiya nefi i gaza*. 1992, no. 11, pp. 12–22 (in Russian).
20. Pustovitenko B.G., Kul'chickij V.E., Goryachun A.V. Zemletryaseniya Krymsko-Chernomorskogo regiona (Earthquakes of the Crimean-Black Sea region). Kiev: Nauk. dumka, 1989, 192 p. (in Russian).
21. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Kapitanova S.A. Processy v ochagovoj zone Krivorozhskogo zemletryaseniya 25 dekabrya 2007 g. (Processes in the focal zone of the Krivoy Rog earthquake on December 25, 2007). *Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2007 god*. Sevastopol': NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2009. pp. 17–22 (in Russian).
22. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Merzhej E.A. Processy v ochagovoj zone Krivorozhskogo-III zemletryaseniya 23 iyunya 2013 g. (Ukraina) (Processes in the focal zone of the Krivoy Rog-III earthquake of June 23, 2013 (Ukraine)) *Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 g*. Sevastopol': NPC «EKOSI-Gidrofizika» 2014, pp. 54–60 (in Russian).
23. Rebeckij Yu.L., Sim L.A., Marinin A.V. Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. Metodiki i algoritmy (From Slip Mirrors to Tectonic Stresses. Methods and Algorithms). M.: GEOS, 2017, 234 p. (in Russian).
24. Svalova V.B. Geotermya i sejsmichnost' Kavkazskogo regiona i obratnaya zadacha geodinamiki (Geothermy and seismicity of the Caucasus region and the inverse problem of geodynamics). *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2019, vol. 9(3), pp. 77–93 (in Russian).
25. Senin B.V., Shajnurov P.B., Ust'yancev V.L. Strukturnaya geologiya Severnogo i Srednego Kaspiya na osnove geologicheskoy interpretacii geofizicheskikh dannyh (Structural Geology of the Northern and Middle Caspian Based on Geological Interpretation of Geophysical Data). *International Conf. On Petroleum Geol. And Hydrocarbon Potential of the Caspian and Black Sea Region*. Baku: Azerbaijan. Abstracts Book. Azerb. Society of Petr. Geol. 2002, B712, pp. 1–4 (in Russian).
26. Senin B.V., Kerimov V.Yu., Mustaev R.N., Leonchik M.I. Strukturno-geodinamicheskie sistemy fundamenta Chernomorsko-Kaspijskogo regiona i ih evolyuciya v pozdnem paleozoe-kajnozoe (Structural and geodynamic systems of the basement of the Black Sea-Caspian region and their evolution in the late Paleozoic-Cenozoic). *Geotektonika*. 2022, no. 1, pp. 27–50 (in Russian).
27. Stepanenko N.Ya., Simonova N.A., Kardanec V. Yu. Prostranstvennye variacii oseb glavnyh napryazhenij v ochagah zemletryasenij oblasti Vrancha (Spatial variations of the principal stress axes in earthquake foci of the Vrancea region). *Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2012 god*. Sevastopol': NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2013, pp. 46–56 (in Russian).
28. Stognij V.V., Stognij G.A. Glubinnoe stroenie i reologicheskaya stratifikaciya zemnoj kory Central'nogo segmenta Bol'shogo Kavkaza (Deep structure and rheological stratification of the earth's crust of the Central segment of the Greater Caucasus). *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2024, vol. 14(2), pp. 6–22 (in Russian).
29. Stognij G.A., Stognij V.V. Yuzhnaya granica Skifskoj plity v sisteme blokovoj delimosti konsolidirovannoj kory Central'nogo i Vostochnogo segmentov Bol'shogo Kavkaza (Deep structure and rheological stratification of the earth's crust of the Central segment of the Greater Caucasus) *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2023, vol. 13(3), pp. 6–18 (in Russian).
30. Ulomov V.I., Polyakova T.P., Medvedeva N.S. Dinamika sejsmichnosti bassejna Kaspijskogo morya (Dynamics of seismicity in the Caspian Sea basin). *Fizika zemli*, 1999, no. 1, pp. 76–82 (in Russian).
31. Hortov A.V., Shlezinger A.E., Yurov Yu.G. Stroenie Yuzhno-Kaspijskogo glubokovodnogo bassejna po dannym sejsmicheskikh issledovanij i perspektivy neftegazonosnosti ego glubinnyh neдр (The structure of the South Caspian deep-water basin based on seismic data and the prospects for oil and gas potential of

- its deep subsoil) *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanyh mestorozhdenij*, 1998, no. 9, pp. 2–7 (in Russian).
32. Shebalin N.V., Ibragimov R. N., Chernov Yu.K. i dr. *Gazlijskie zemletryaseniya 1976 i 1984 gg. (Gazli earthquakes of 1976 and 1984) / Red. V.I. Ulomov, I.V. Shebalin, S.S. Aref'ev, G.Yu. Azimov, R. P. Fedina.* Tashkent: Fan, 1986, 368 p. (in Russian).
  33. Sholpo V.N. *Al'pijskaya geodinamika Bol'shogo Kavkaza (Alpine Geodynamics of the Greater Caucasus).* M.: Nedra, 1978. 176 p. (in Russian)/
  34. Shchukin, Yu. K. *Atlas glubinnogo stroeniya ochagovyh zon zemletryasenij (Atlas of the deep structure of earthquake focal zones) / Yu.K. Shchukin, N.V. Shebalin; otv. red. A.A. Malovichko.* Voronezh: Izdatel'sko-poligraficheskij centr «Nauchnaya kniga», 2016, 102 p. (in Russian)/
  35. Yunga S.L. *Sejsmotektonicheskie deformacii i napryazheniya v skladchatyh poyasah neotektonicheskoy aktivizacii Severnoj Evrazii (Seismotectonic deformations and stresses in folded belts of neotectonic activation of Northern Eurasia).* *Fizika Zemli*, 1996, no. 12, pp. 37–58 (in Russian).
  36. Yakobson A.N. *Litosfera Yuzhnogo Kaspiya. Tomograficheskaya model' (Lithosphere of the Southern Caspian. Tomographic model).* *Otechestvennaya geologiya*, 2002, no. 2, pp. 54–64 (in Russian).
  37. Anderson E.M. *The dynamics of faulting.* *Trans. Edinburgh, Geol.* 1951. Sec. (8), pp. 387–402.
  38. Volfman Yu.M., Kolesnikova E.Ya., Pustovitenko B.G., Milyukov V.K. *Selective Manifestation of Sismogenic 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.
  39. 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.
  40. *Baza dannyh aktivnyh razlomov Evrazii i prilegayushchih akvatorij (AFEAD). (Database of active faults of Eurasia and adjacent waters).* [Elektronnyj resurs] URL: [http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database\\_map.html](http://neotec.ginras.ru/index/mapbox/database_map.html) (data obrashcheniya 06.05.2025).
  41. *Evropejsko-Sredizemnomorskij sejsmologicheskij centr (EMSC). (European-Mediterranean Seismological Center).* [Elektronnyj resurs] URL: [emsc-csem.org](http://emsc-csem.org) (data obrashcheniya 08.04.2025).
  42. *Mezhdunarodnyj sejsmologicheskij centr (International Seismological Centre) (ISC).* [Elektronnyj resurs] URL: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin> (data obrashcheniya 20.11.2021).
  43. *Sejsmologicheskij katalog Kolumbijskogo universiteta (Columbia University Seismological Catalog).* [Elektronnyj resurs] URL: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html> (data obrashcheniya 20.01.2022)
  44. *FIC «Edinaya geofizicheskaya sluzhba RAN». (Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences").* [Elektronnyj resurs] URL: [http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info\\_quake.pl](http://www.ceme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl) (data obrashcheniya 29.05.2025).

*Поступила в редакцию 18.07.2025 г.*