

УДК 550.348

ИЗБИРАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР ПРОЯВЛЕНИЯ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ В ПРЕДЕЛАХ СРЕДИЗЕМНОМОРСКОГО ПОЯСА (ПО ДАННЫМ РЕШЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ)

© 2017 г. Ю. М. Вольфман¹, Е. Я. Колесникова¹,
Б. Г. Пустовитенко¹, В. К. Милюков²

¹Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО “Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского”
Республика Крым, 295048 Симферополь, ул. Трубоченко, 23А, п/я 2733

²Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

МГУ им. М.И. Ломоносова

119234 Москва, Университетский проспект, 13

¹e-mail: seism.volf@gmail.com

²e-mail: vmilyukov@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.03.2016 г.

На примере отдельных сегментов Средиземноморского пояса (Загроса, Вранча, Крымско-Кавказско-Черноморского региона) обосновано разнообразие проявлений сейсмогенеза как следствия влияния весьма изменчивых систем тектонических напряжений, характеризующихся, в то же время, избирательностью ориентировок главных осей. Приведены стереографические модели сейсмогенеза, результаты параметризации и структурно-кинематической идентификации элементов внутренней структуры сейсмогенных областей. Установлен дискретный характер проявления сейсмогенерирующих полей напряжений как по отношению к сторонам света (к оси вращения Земли), так и относительно земной (горизонтальной) поверхности. Показано, что многообразие обстановок сейсмогенеза является следствием трансформаций полей напряжений, происходящих как на региональном, так и на локальном уровнях в зонах динамического влияния основных сейсмогенных структур исследуемых регионов.

DOI: 10.7868/S0203030617060062

ВВЕДЕНИЕ

Сравнительный анализ кинематических обстановок сейсмогенного разрывообразования показал, что горно-складчатые области, формирующиеся при коллизионном взаимодействии литосферных плит, представляют собой весьма динамичные системы, подверженные влиянию разнообразных полей напряжений, изменения и трансформации которых происходят в течение чрезвычайно коротких промежутков времени [Гущенко, 1979б; Вольфман, 2013 и др.]. Об этом свидетельствуют как пространственно-временное разнообразие проявления кинематических условий и деформационных режимов сейсмогенеза, так и существенные различия в параметрах механизмов очагов сильных землетрясений и их афтершоков (например, Газлийских землетрясений 1976–1984 гг. [Шебалин и др., 1986] и других).

С другой стороны, многими исследователями в области тектонофизики и сейсмотектоники отмечена некоторая избирательность ориентировок

полей напряжений, обусловивших процессы новейшего и современного тектонического (в том числе сейсмогенного) разрывообразования [Широкова, 1967; Гущенко, 1979б; Шебалин и др., 1986; Юнга, 1996; Новик, Вольфман, 1997; Гинтов, 2005; Вольфман, 2015 и др.]. Так, на примере альпийского Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса и его отдельных фрагментов было показано, что в тензорах напряжений, реконструированных при решениях механизмов очагов землетрясений, преобладают субмеридиональные и диагональные ориентировки осей сжатия. При этом нередко отмечаются как инверсионные изменения кинематических обстановок (когда оси сжатия и растяжения меняются местами), так и переходы от ортогональных систем напряжений к диагональным и наоборот [Гущенко, 1979б; Юнга, 1996; Вольфман, 2013; Вольфман, Колесникова, 2014 и др.].

Применение методов тектонофизической интерпретации сейсмологических данных (в частности,

способа выделения структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений в очагах и построения стереографических моделей сейсмогенеза [Вольфман, 2013 и др.] расширяет возможности исследования обстановок и напряженно-деформированного состояния среды в очагах землетрясений, а также повышает надежность параметризации сейсмогенных зон.

ЦЕЛИ И ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Цели проводимых исследований: 1) реконструкция доминирующих кинематических обстановок сейсмогенного разрывообразования в пределах отдельных сегментов Средиземноморского складчатого пояса; 2) построение стереографических моделей сейсмогенеза; 3) сравнительный анализ процессов разрывообразования в очагах землетрясений в пределах изучаемых объектов на предмет закономерного проявления ориентировок систем тектонических напряжений и локальных трансформаций последних.

В качестве исследуемых объектов выбраны сейсмически активные сегменты альпийского Средиземноморского пояса, различающиеся строением, геодинамической позицией и особенностями проявления сейсмогенеза: система Загрос, очаговая область Вранча, Черноморско-Кавказский регион (в пределах географических координат $\varphi = 40 \div 47^\circ\text{N}$, $\lambda = 37 \div 50^\circ\text{E}$) и собственно акватория Черного моря (рис. 1).

Система Загрос является геоструктурным выражением зоны конвергенции Аравийской плиты и Евразии. В современной геодинамической трактовке она позиционируется как северо-восточный фланг Аравийского Синтаксиса протяженностью более 2 тыс. км. Структурная выраженность системы Загрос позволяет вполне уверенно ограничить область ее динамического влияния, исключив из выборки данных по механизмам очагов землетрясений региона те из них, которые находятся за пределами этой зоны. При этом объем выборки представляется вполне репрезентативным для изучения особенностей сейсмогенеза региона. Очаги землетрясений локализованы, главным образом, в пределах земной коры на глубинах 20–40 км. Двойственная геодинамическая природа системы Загрос – правосдвиговая и палеосубдукционная (взбросо-надвиговая) – нашедшая отражение в палеогеодинамических реконструкциях и геолого-тектонических построениях [Зоненшайн и др., 1987; Баженов, Буртман, 1990 и др.], равно как и сложная внутренняя ее структура, проявляются и в характере сейсмогенеза. Это обстоятельство априори гарантировало разнообразие структурно-кинематических типов и параметров создаваемых стереографических моделей, отражающих различные деформационные режимы и кинематические обстановки сейсмогенеза [Вольфман, 2013; Вольфман и др., 2014].

Очаговая область Вранча приурочена к зоне сочленения Восточных и Южных Карпат ($\varphi = 45\text{--}46^\circ\text{N}$

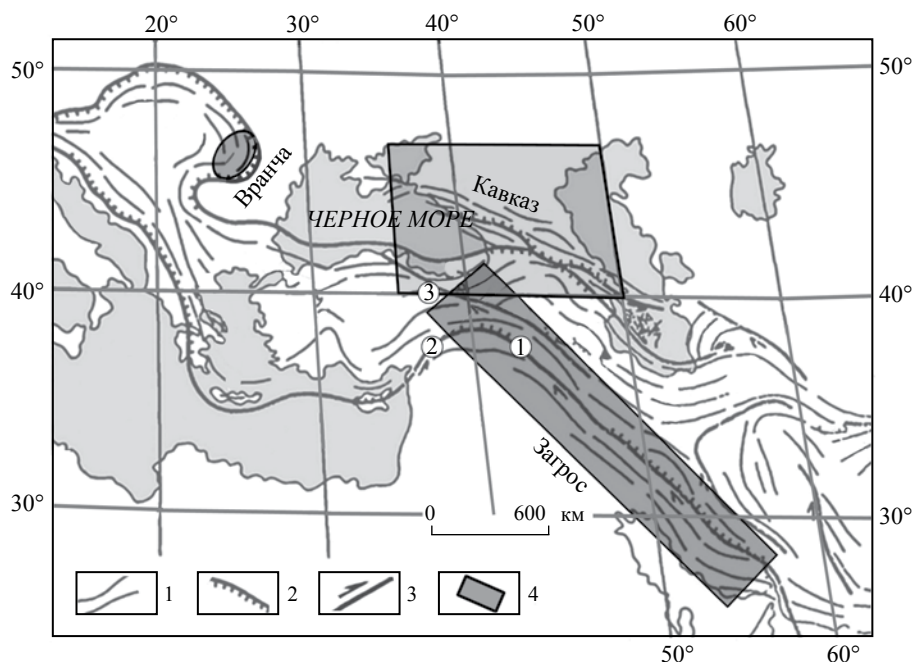


Рис. 1. Положение исследуемых объектов в системе Средиземноморского складчатого пояса (структурная основа, по [Баженов, Буртман, 1990] с упрощениями).

1 – простирающие складки; 2 – надвиги, фронт шарьяжей; 3 – сдвиги; 4 – исследуемые регионы. Цифры в кружках – зоны региональных разломов: 1 – Загроса, 2 – Анатолийского, 3 – Северо-Анатолийского.

и $\lambda = 26-27^\circ \text{ E}$) – к Юго-восточному ороклину Карпат [Гинтов и др., 2015]. В плане она представляет собой эллипсоидное высококонцентрированное скопление многочисленных очагов коровых и подкоровых землетрясений площадью $\sim 120 \times 50 \text{ км}^2$, вытянутое в северо-восточном направлении. Несмотря на значительную удаленность от Крыма (более 500 км), наиболее сильные, произошедшие относительно недавно глубоководные землетрясения Вранча, ощущались жителями полуострова (04.03.1977, магнитуда $M = 7.2$; 30.08.1986, $M = 6.3$; 30.05.1990, $M = 6.7$). Очаги анализируемых землетрясений локализованы в верхней мантии, основное их количество приурочено к интервалу 130–160 км [Степаненко и др., 2013]. Следует отметить, что применение в данной и иных работах термина “разрыв” для сейсмогенных деформаций, происходящих на таких глубинах, возможно, не совсем корректно, поскольку сейсмические процессы в верхней мантии могут отличаться от таковых в земной коре. Однако для решения механизмов очагов, формирующихся как в приповерхностных, так и в глубинных условиях, применяется один и тот же алгоритм, учитывающий характер распределения на стереограммах знаков первых вступлений продольных волн.

Таким образом, результаты исследований механизмов очагов в пределах системы Загрос и области Вранча отражают кинематические обстановки сейсмогенеза разных глубинных уровней – корового и верхнемантийного соответственно.

Крымско-Черноморско-Кавказский регион представляет собой сложную геодинамическую систему на стыке Евразии, Аравийской плиты, Турецкой и Иранской субплит. В его строении нашли отражение как процессы конвергенции и коллизии разных сегментов литосферы (например, покровно-складчатое сооружение Большого Кавказа), так и дивергентные структуры (субокеанические впадины Черного, а в непосредственной близости от региона – и Каспийского морей). Эта суперпозиция исследуемого объекта обусловила многообразие проявлений сейсмичности, выразившееся в особенностях разрывообразования: в регионе идентифицированы механизмы очагов землетрясений всех типов кинематических обстановок и деформационных режимов. Преобладающая часть этих очагов локализована в пределах земной коры.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Фактологической основой исследований послужили решения механизмов очагов землетрясений из сейсмологического каталога Гарвардского университета (США) и данные, размещенные на иных сайтах Internet-ресурса: Геофизической службы РАН, Средиземноморского сейсмологического центра, Виртуальной лаборатории по

тектонофизическому анализу современных и палеонапряжений (авторы Ю.Л. Ребецкий и др.). Также использованы опубликованные и рукописные каталоги решений механизмов очагов из других источников [Степаненко и др., 2013; Пустовитенко, 1977, 2002; Пустовитенко, 2008, 2015 и др.]. В конечном итоге выборки данных содержат: по системе Загрос – 122, по Вранча – 80, по Черноморско-Кавказскому региону – более 350 событий с $M \geq 3.5$. Выборка по акватории Черного моря насчитывает 26 механизмов очагов землетрясений с $M > 3.0$.

Методология исследований базируется на принципах кинематического анализа структур разрушения и реконструкции напряжений в очагах землетрясений, разработанных Д. Макензи [Mc. Kenzie, Dan, 1969], О.И. Гущенко [Гущенко, 1979а] и А.В. Введенской [Введенская, 1969]. На их основе авторами данной статьи предложен и апробирован способ выделения структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений в очагах и построения стереографических моделей сейсмогенеза [Вольфман, 2013; Вольфман и др., 2014]. Установлено, что в границах одного региона параметры очагов (ориентировки нодальных плоскостей со сходными траекториями подвижек, проекции векторов смещений, проекции осей сжатия и растяжения) образуют обособленные скопления в пределах ограниченных сегментов стереограмм, отражая разные условия сейсмогенеза. Поэтому очаги, имеющие близкие параметры и способные удовлетворять условиям одного поля напряжений, объединяются, рассматриваясь в качестве *стереографической модели определенного типа сейсмогенеза*, а в случае закономерного или компактного расположения соответствующих очагов – в качестве *модели сейсмогенной зоны*. При этом учитывается, что реализация разрывов в очаге может осуществляться как в плоскости главных касательных напряжений (в структурно-парагенетической интерпретации – это L - и L' -сколы), так и несколько отклоняясь от нее в сторону оси сжатия – сколы Риделя или R - и R' -сколы, а величина коэффициента Лоде-Надаи приближается к нулю. Способ апробирован при идентификации сейсмогенных зон в пределах системы Загрос [Вольфман, 2013; Вольфман и др., 2014] и в области Вранча [Вольфман, Колесникова, 2014; Гинтов и др., 2015], а также при тектонофизическом изучении условий новейшего разрывообразования (по зеркалам скольжения на стенках трещин) в пределах Горного Крыма [Вольфман, 2007, 2015].

Для дифференциации очагов по типам деформационных режимов применялась классификация [Гущенко и др., 1991], основанная на принятых в тектонофизике параметрах – углах наклона к горизонту γ^1 , γ^2 и γ^3 главных осей нормальных

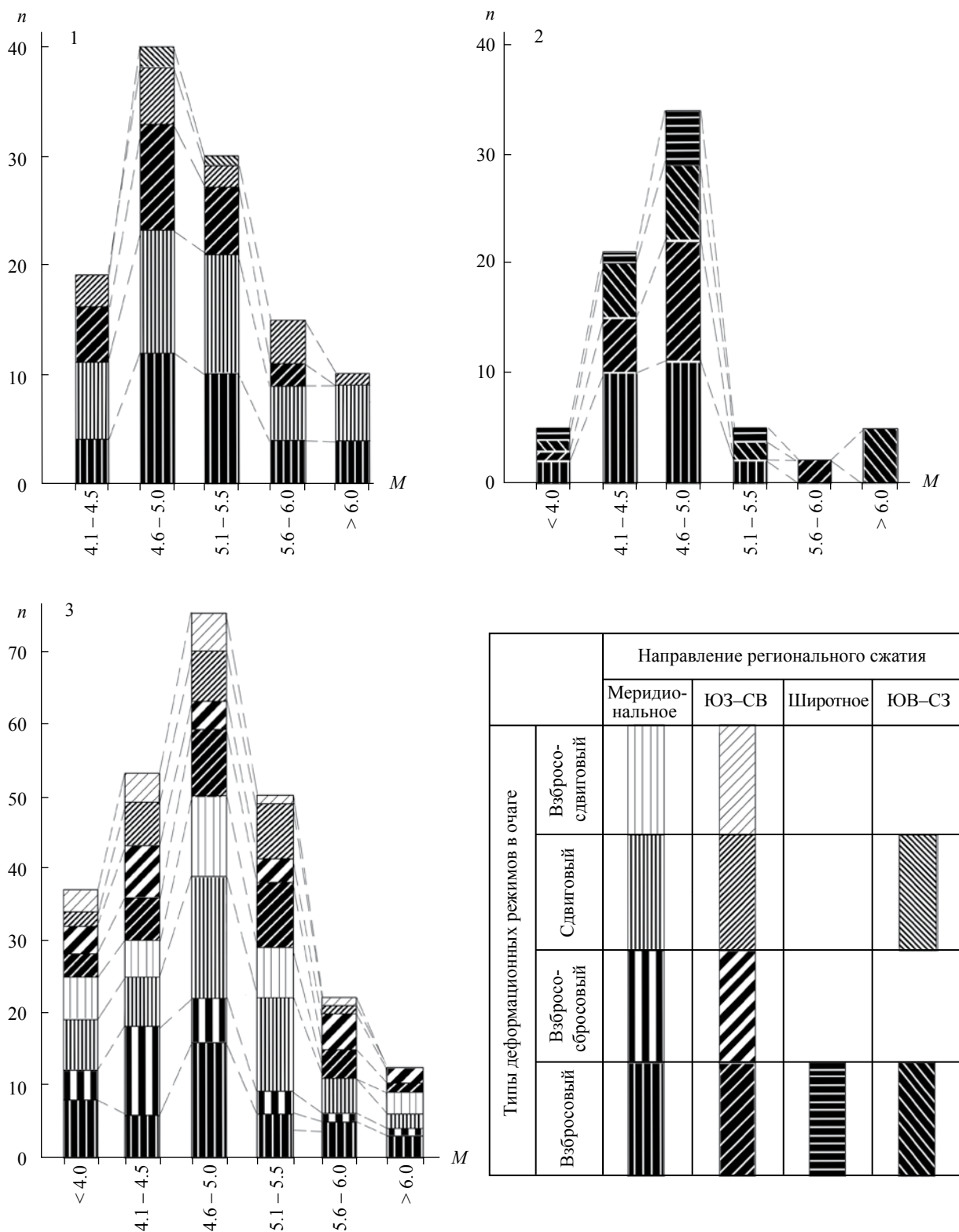


Рис. 2. Распределение по магнитуде землетрясений (в построенных моделях сейсмогенеза), сформировавшихся в условиях разных деформационных режимов и кинематических обстановок, в пределах системы Загрос (1), области Вранча (2) и Черноморско-Кавказского региона (3).
Условные обозначения см. врезку (таблица).

напряжений σ_1 , σ_2 и σ_3^1 (в решениях механизмов очагов землетрясений – оси P , T и N , соответственно, в пересчете на нижнюю полусферу). Взбросовый и сдвиговый режимы, которые характеризуются горизонтальным положением оси сжатия, отнесены к “идеальным” деформационным режимам [Гинтов, 2005]. Учитывая общие особенности геодинамики литосферы, обусловленные доминирующим влиянием горизонтально ориентированных полей тектонических напряжений, указанные режимы отнесены к разряду первичных.

Существенное преобладание кинематических обстановок регионального сжатия (около 80%) обусловило целесообразность привлечения для анализа механизмы очагов, сформировавшихся в условиях взбросового, взбросо-сдвигового, сдвигового и взбросо-сбросового² деформационных режимов, присущих этим обстановкам. Распределение по магнитудам анализируемых событий, сформировавшихся в условиях разных деформационных режимов и кинематических обстановок, приведено на рис. 2. Следует отметить, что относительно небольшое количество землетрясений с $M < 4.5$ по всем объектам исследований, обусловлено не естественным характером распределения, а причинами методического характера – ограниченными возможностями решений механизма очага для землетрясений малых энергий ввиду непредставительности данных о первых вступлениях сейсмических волн.

Таким образом, методология исследований предполагает: а) дифференциацию очагов землетрясений или их совокупностей по характеру деформационных режимов и кинематических обстановок с построением стереографических моделей соответствующих типов сейсмогенеза; б) вариативный подход к интерпретации решений механизмов очагов с позиций структурно-парагенетического и кинематического методов тектонофизики; в) структурно-кинематическую идентификацию и пространственную параметризацию сейсмогенных зон разных типов с учетом латерального (в плане) и вертикального (на разрезах) распределения однотипных очагов.

¹ Сжатие принято положительным при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ [Гинтов, 2005].

² Следует акцентировать внимание на том, что в данном случае речь идет не о кинематическом типе разрыва (по-скольку “взбросо-сбросов” в природе не существует), а о типе деформационного режима, при котором углы наклона осей напряжений P , N и T составляют: $\gamma^1 > 30^\circ$, $\gamma^2 < 30^\circ$ и $\gamma^3 > 30^\circ$ [Гущенко и др., 1991; Гинтов, 2005]. Нодальные плоскости в очагах, формирующихся в условиях взбросо-сбросовых режимов, являются взбросами и надвигами (при углах наклона оси P в интервале $30-45^\circ$) или сбросами (при углах наклона оси T в этом же интервале).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ: ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СЕЙСМОГЕНЕЗА В ПРЕДЕЛАХ ИЗУЧАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ

Система Загрос

Методика тектонофизической интерпретации механизмов очагов с применением способа построения стереографических моделей разных типов сейсмогенеза впервые была апробирована именно на материалах системы Загрос [Вольфман, 2013; Вольфман и др., 2014]. Поэтому для обоснования достоверности полученных результатов вся выборка данных была разбита на два временных интервала, включающих события до 2001 г. включительно (“основная” выборка – 100 очагов) и последующие землетрясения – с 2002 г. до настоящего времени (“контрольная” или “верификационная” выборка – 22 очага). Отдельно для каждого интервала строились модели сейсмогенеза с целью последующего сопоставительного анализа результатов, полученных по двум “случайным” выборкам.

Основные особенности разрывообразования в очагах землетрясений системы Загрос аппроксимированы четырьмя типами стереографических моделей [Вольфман, 2013; Вольфман и др., 2014], которые охватывают 111 решений очагов (91% от общего количества) и отражают доминирующие кинематические обстановки (меридионального и юго-западного–северо-восточного сжатия) и деформационные режимы (сдвиговый и взбросовый) сейсмогенеза в регионе (рис. 3).

Очаги сдвигового типа, сформировавшиеся в условиях меридионального сжатия (рис. 3а, д), локализованы вдоль северо-восточного фланга Аравийского Синтаксиса в виде правосдвиговой зоны северо-западного простираения, а также в области сочленения Загроса с зонами Анатолийских разломов (см. рис. 3к). В первом случае сейсмогенные разрывы, вероятнее всего, имеют северо-западную ориентировку, во втором возможна их реализация как общезагросского (северо-западного), так и северо-восточного направления, соответствующего положению Анатолийской зоны. Суммарный каталог землетрясений данного типа (39 решений механизмов очагов из обеих – “основной” и “верификационной” – выборок, что составляет 32% от общего объема) содержит наибольшее количество (пять) катастрофических событий с $M > 6.0$ (см. рис. 2), вызвавших разрушения зданий и сооружений и повлекших многочисленные человеческие жертвы. Они приурочены как к области сочленения системы Загрос с зоной Анатолийского разлома (24.11.1976 г., $M = 6.1$; 30.10.1983 г., $M = 6.9$; 08.03.2010 г., $M = 6.1$), так и к юго-восточному флангу Загроса (03.05.1989 г., $M = 6.2$; Каребасское землетрясение 06.05.1999 г., $M = 6.3$).

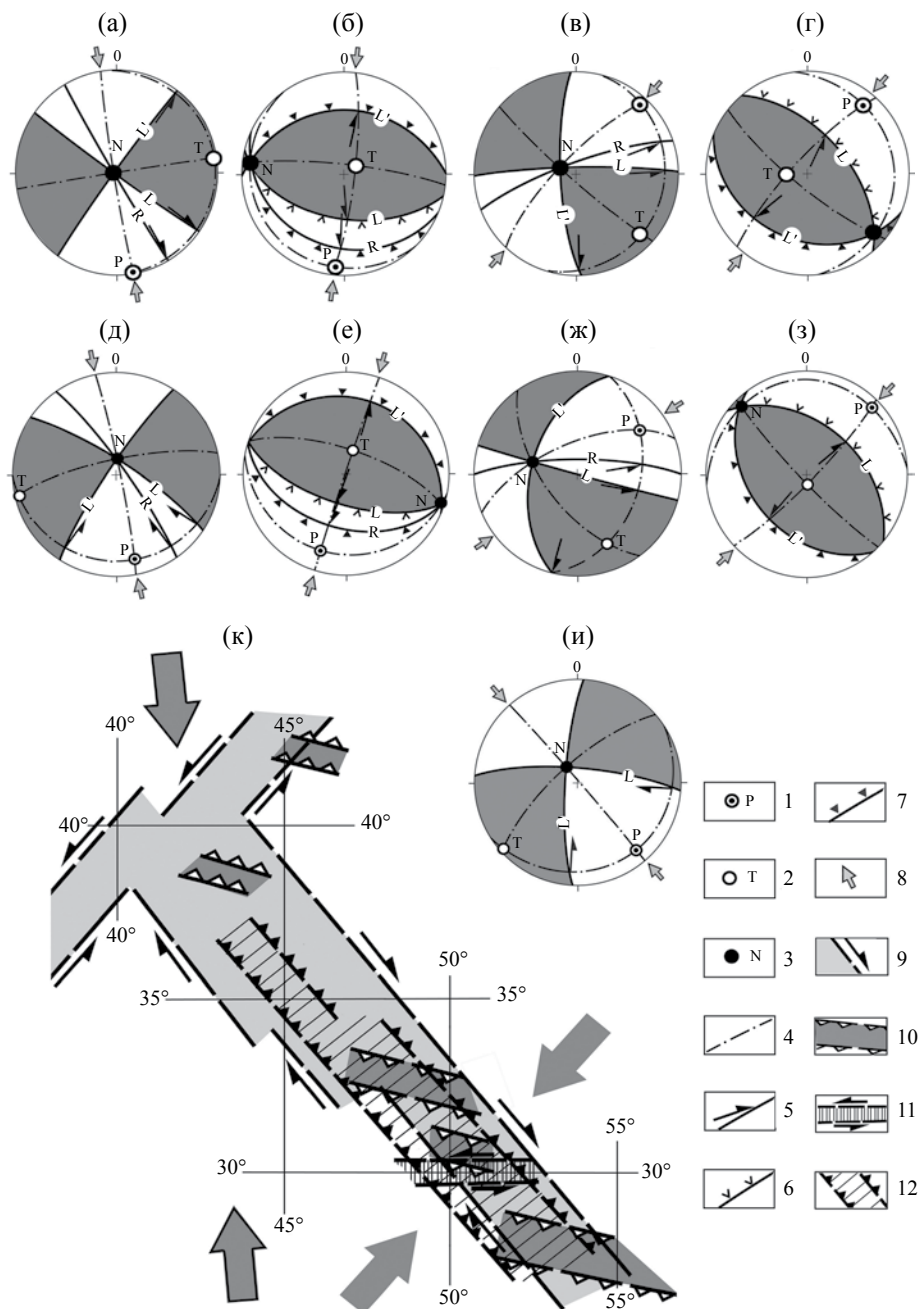


Рис. 3. Стереографические модели основных типов сейсмогенеза системы Загрос (а–и) и схема образуемых ими сейсмогенных зон (к): в верхнем ряду (а–г) – построенные по данным “основной” выборки, в нижнем ряду (д–з) – по данным “верификационной” выборки, (и) – по единичным событиям из обеих выборок (остальные пояснения см. в тексте; здесь и далее, кроме рис. 8, все построения на нижней полусфере).
 На стереограммах: 1–3 – проекции главных осей напряжений (1 – максимального сжатия, 2 – минимального сжатия, 3 – промежуточной); 4 – проекции плоскостей размещения главных осей напряжений; 5–7 – проекции плоскостей вероятных сейсмогенных разрывов (L, L', R – типы сколов и направление перемещения лежачего крыла разрыва) и их структурно-кинематические характеристики: сдвиги (5), взбросы (6), надвиги (7); 8 – направление сжатия.
 На схеме: сейсмогенные зоны, обусловленные обстановками субмеридионального (9 – сдвиговые, 10 – взбросовые) и юго-западного–северо-восточного сжатия (11 – сдвиговые, 12 – взбросовые); большие парные стрелки – направления регионального сжатия.

Группа взбросовых землетрясений, сформировавшихся в аналогичных кинематических условиях (см. рис. 3б, е) в количественном отношении не уступает сдвиговым (34 решения из обеих выборок

или 28%). Они локализованы в пределах относительно узких непротяженных зон субширотной ориентировки, косоперечных по отношению к основной сейсмогенной зоне общезагросского

направления (см. рис. 3к). Вероятно, взбросовые (взбросо-надвиговые) разрывы в очагах землетрясений данного типа относятся к разряду компенсационных структур, которые образуются в зоне динамического влияния сдвигового типа в обстановках, когда возможности релаксации напряжений путем пластических деформаций и перемещений вдоль сдвигов полностью исчерпаны. Тем не менее, четыре землетрясения этого типа с $M > 6.0$ имели катастрофический характер, обусловивший многочисленные жертвы и разрушения (07.12.1988 г., $M = 6.8$; 22.06.2002 г., $M = 6.2$; 27.11.2005 г., $M = 6.1$; 23.11.2011 г., $M = 7.1$). Три из них (в том числе самое сильное землетрясение в Турции за последние годы с $M = 7.1$) произошли в последнее десятилетие.

Сейсмогенез сдвигового типа, обусловленный обстановками юго-западного—северо-восточного сжатия (см. рис. 3в, ж), проявлен относительно слабо (15 решений или 12% очагов общей выборки). По-видимому, сейсмогенным разрывам соответствуют плоскости, ориентированные в широтном направлении, поскольку очаги локализованы в пределах относительно узкой зоны аналогичного простирания (см. рис. 3к). Зарегистрировано только одно землетрясение данного типа с магнитудой выше 6.0 (11.08.1988 г., $M = 6.1$).

В условиях юго-западного—северо-восточного сжатия реализовались и землетрясения, аппроксимируемые моделью взбросового типа (см. рис. 3г, з) и составляющие около 19% от объема выборки (23 решения механизма очага). Они локализованы, главным образом, на юго-восточном фланге и (в меньшей мере) в центральной части Загроста, образуя зону северо-западного простирания, пространственно совпадающую с основной областью проявления правосдвиговых сейсмогенных деформаций (см. рис. 3к). Хотя простирание обеих нодальных плоскостей модели согласуется с ориентировкой самой зоны, в случае однонаправленного разрыва в очаге наиболее вероятной является активизация взброса с падением на северо-восток (L), поскольку его пространственно-кинематические параметры соответствуют положению зоны палеосубдукции Аравийской плиты под Евразийский континент. Именно таким образом идентифицирован сейсмогенный разрыв в очаге единственного землетрясения данного типа, имеющего магнитуду 6.0 (22.04.1976 г.).

Сравнение параметров однотипных моделей сейсмогенеза, полученных по данным “основной” (см. рис. 3а–г) и “верификационной” (см. рис. 3д–з) выборок, показало высокую сходимость построений: расхождение в ориентировках (азимут/угол падения) осей сжатия составило 7–20°; разница же в азимутах направлений основной оси P не превышает 12°, что не выходит за пределы допустимых отклонений при решении механизма очага. Пространственное распределение событий из

“контрольной” выборки, отнесенных к тому или иному типу, также хорошо согласуется с положением соответствующих зон сейсмогенеза, геометризованных по данным “основного” каталога. Это подтверждает корректность применения данного методического подхода и свидетельствует о качественном выполнении стереографических построений.

Обстановки юго-восточного—северо-западного сжатия проявились в регионе гораздо менее интенсивно. Тем не менее, весьма близкие (отличающиеся всего на несколько градусов) параметры 3-х очагов землетрясений (13.04.1998 г., $M = 4.8$; 25.03.2004 г., $M = 5.0$ и 28.03.2004 г., $M = 5.3$), локализованных в узле сочленения системы Загрост и зон Анатолийских разломов, позволили обосновать еще один тип сейсмогенеза — сдвиговый юго-восточного—северо-западного сжатия. Обобщенная (по данным обеих выборок) модель этого типа приведена на рис. 3и.

Таким образом, более 93% (114 из 122-х) решений механизмов очагов в пределах исследуемой территории можно аппроксимировать 5-ю типами моделей, которые характеризуются строго секторальным (в пределах узких азимутальных интервалов) распределением ориентировок осей сжатия. Четыре основных типа (91% решений очагов) отражают доминирующие кинематические обстановки, предопределенные особенностями строения и геодинамического развития системы Загрост [Зоненшайн и др., 1987; Jackson et al., 1981; Jackson, McKenzie, 1988; Jackson et al., 1995 и др.]: а) проявления сейсмогенеза, обусловленного условиями меридионального сжатия, указывают на продолжающееся в настоящее время движение Аравийской плиты в северном направлении; б) наличие очагов юго-западного—северо-восточного сжатия вызвано влиянием на изучаемую территорию процессов дивергенции в пределах Красноморского рифта, вследствие чего Аравийский полуостров перманентно “напирает” на Евразию в северо-восточном направлении. Количественное соотношение очагов землетрясений (в том числе, катастрофических), сформировавшихся в результате этих геодинамических обстановок (60% и 31% соответственно), свидетельствует о преобладающем влиянии первого из указанных факторов на процессы сейсмогенеза в регионе.

Область Вранча

Основная часть идентифицированных землетрясений Вранча формировалась в условиях взбросовых деформационных режимов [Степаненко и др., 2013]: очаги этого типа в исследуемой выборке составляют около 89%. Нодальные плоскости в решениях их механизмов представлены взбросами (угол падения $>45^\circ$) и надвигами ($<45^\circ$). Режимы иных типов проявились весьма ограниченно.

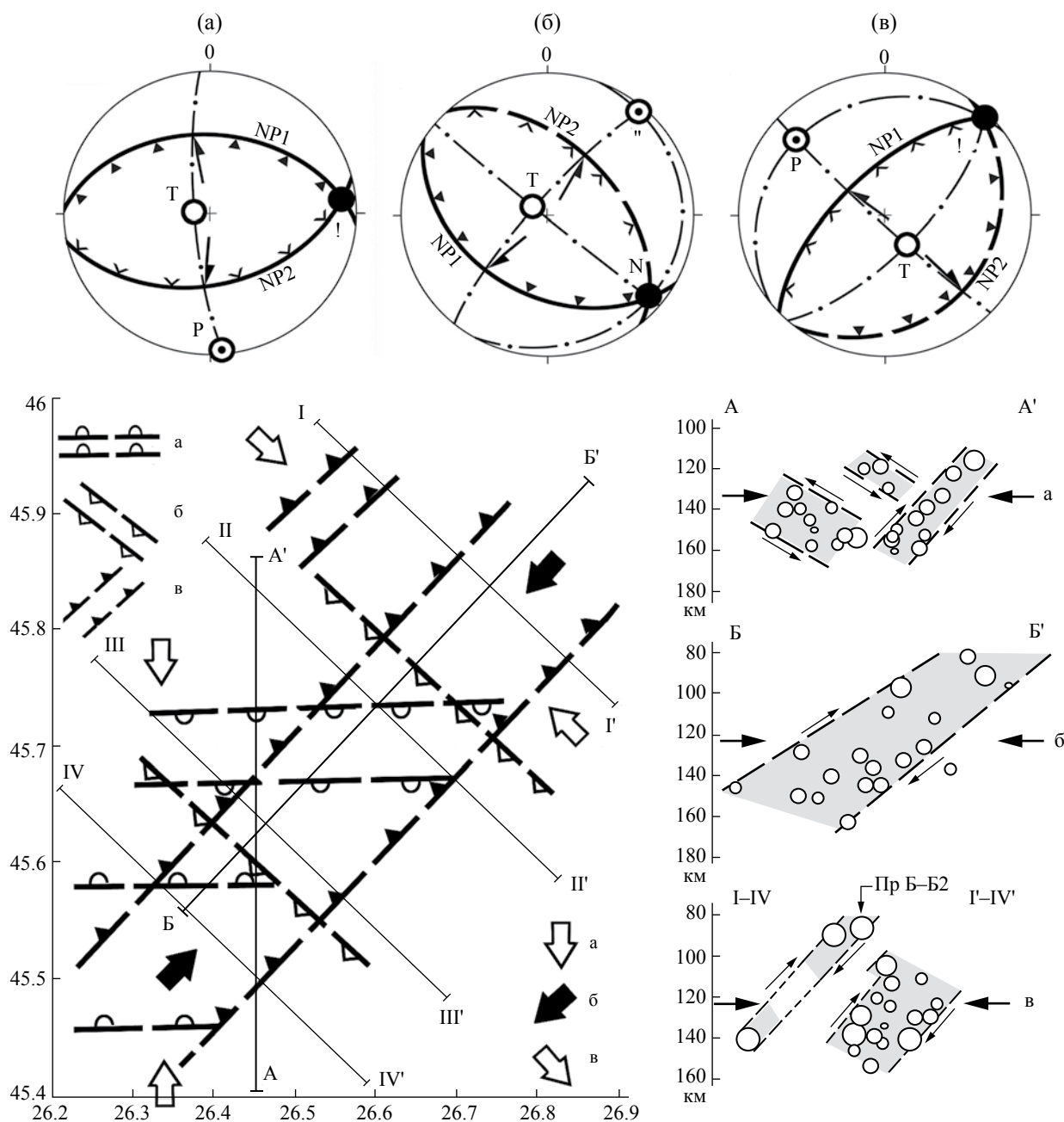


Рис. 4. Стереографические модели основных типов сейсмогенеза области Вранча (а–в), схема образуемых ими зон (соответственно, а–в) на срезе глубин 140 км (слева) и положение очагов землетрясений этих типов на разрезах (справа).

На схеме и разрезах: большие стрелки – направления сжатия для обстановок соответствующего типа, мелкие (на разрезах) – направления перемещений бортов сейсмогенных зон; бергштрихи (на схеме) – в сторону падения зон; гипоцентры очагов, локализованных возле профилей I–IV (разрез в), совмещены по линии пересечения профилей I–IV с профилем Б–Б'.

Землетрясения области Вранча обусловлены, главным образом, обстановками ортогонального (меридионального и широтного) и диагонального (юго-западного–северо-восточного и юго-восточного–северо-западного) сжатия. При этом очаги трех доминирующих типов надежно аппроксимируются стереографическими моделями,

а образуемые ими зоны довольно уверенно выделяются в плане и в разрезе (рис. 4).

В обстановках меридионального сжатия реализовались взбросовые землетрясения (25 событий – 31% от объема выборки данных по Вранча), локализованные в пределах 3-х зон с северным и южным падением (см. рис. 4 – стереограмма, зоны на

схеме и разрез А–А' с индексом "а"). Особенностью модели является значительное сходство в разных очагах параметров одной из нодальных плоскостей (*NPI*) при некотором разбросе ориентировок вторых плоскостей с падением в южных румбах – от юго – юго-западного до юго – юго-восточного. Соответственно, несколько варьируется и ориентировка тензоров напряжений в решениях отдельных механизмов очагов, что, по-видимому, можно расценивать, как результат локальных трансформаций сейсмогенерирующего поля. Однако при этом доминирующим направлением сжатия для всей выборки является меридиональное. Учитывая двунаправленное падение сейсмогенных зон, можно предположить, что сейсмогенез данного типа является отражением сложной природы тектонического сочленения и геодинамического взаимодействия основания Южных Карпат с Мизийской плитой.

Землетрясения, обусловленные обстановками юго-западного–северо-восточного сжатия, локализованы в центральной части области Вранча. Образующая ими сейсмогенная зона довольно уверенно выделяется и в плане, и в разрезе (см. рис. 4 – стереограмма, зона на схеме и разрез Б–Б' с индексом "б"), погружаясь на юго-запад. Поэтому в качестве плоскости реальных сейсмогенных деформаций данной модели сейсмогенеза, реконструированной по 19-ти очагам (24%), предполагается нодальная плоскость *NPI* (см. рис. 4, стереограмма "б"). На разрезе видно, что зона неоднородна по своему строению: очаги локализованы преимущественно в интервалах глубин 80–110 км и 125–155 км, при этом наиболее сильные землетрясения (31.05.1990 с $M = 5.9$ и 27.10.2004 с $M = 5.6$) расположены в верхней части – на глубинах 90–100 км. В тектоническом отношении данная зона, по-видимому, может рассматриваться, как одно из проявлений мегаструктуры, именуемой тектонической линией Тейссеера-Торнквиста. Следует добавить, что пространственно-кинематические характеристики этой сейсмогенной зоны (простираение, направление падения, надвиговая природа) согласуются с таковыми в покровно-надвиговом сооружении Восточных Карпат.

Стереографическая модель сейсмогенеза, обусловленного обстановками юго-восточного–северо-западного сжатия (см. рис. 4, стереограмма "в"), построена по решениям механизмов очагов 20-ти землетрясений (25%). Эта выборка включает большую часть сильных землетрясений (22.10.1940, $M = 6.2$; 04.03.1977, $M = 7.2$; 30.08.1986, $M = 6.3$; 30.05.1990, $M = 6.7$), в том числе, самое катастрофическое из известных событий региона – землетрясение 10.11.1940 с $M = 7.4$ (см. рис. 2). Очаги этого типа локализованы, в основном, вдоль осевой части области Вранча, образуя две сейсмогенные зоны северо-восточного простираения с падением на северо-запад (см. рис. 4 – зоны на схеме и разрез с индексом "в"). Таким образом, есть основания

полагать, что реальные сейсмогенные разрывы имеют аналогичные параметры и аппроксимируются плоскостью *NPI* соответствующей модели. Изосейсты большей части сильных и катастрофических землетрясений Вранча также имеют вытянутость в северо-восточном направлении. В приповерхностном строении региона геоструктуры аналогичного простираения, способные генерировать землетрясения со столь высокой магнитудой ($M > 6-7$), не выявлены. Однако в работах [Соллогуб, Чекунов, 1985 и др.] в области сочленения Восточных и Южных Карпат отмечалось наличие мантийной неоднородности северо-восточного простираения, которая рассматривалась как фрагмент мантийного разлома планетарного масштаба, трассирующегося от о-ва Сицилия до Урала, а зона Вранча – как фрагмент этого глубинного линеймента. Позже наличие неоднородности на глубинах более 70 км, соответствующей направлению вышеописанной разломной зоны (см. рис. 4в), было установлено по результатам сейсмотомографических исследований [Koulakov et al., 2010].

Четвертый тип сейсмогенеза Вранча – взбросовый в обстановке субширотного сжатия – статистически малопредставителен (7 очагов), поэтому построение модели и геометризация границ зоны распространения соответствующих землетрясений являются проблематичными. Тем не менее, основные особенности сейсмогенеза этого типа (меридиональная ориентировка нодальных плоскостей с падением на запад и восток) позволяют вполне уверенно идентифицировать кинематическую обстановку, как субширотное сжатие с ориентировкой оси $P \approx 94^\circ$ с углом наклона 8° [Вольфман, Колесникова, 2014].

Таким образом, в пределах Вранча очаги землетрясений разных кинематических типов образуют несколько сейсмогенерирующих зон, границы и параметры (ориентировки простираения, углы и направления падения) которых вполне уверенно устанавливаются как в плане, так и в разрезе (см. рис. 4). Однотипные зоны формировались (и периодически активизируются) в сходных кинематических обстановках, под воздействием определенным образом ориентированных полей напряжений, три из которых (субмеридионального, юго-западного–северо-восточного и юго-восточного–северо-западного сжатия) проявились наиболее интенсивно. Аномально высокая сейсмичность региона обусловлена наложением (взаимными пересечениями) разнотипных зон в пределах весьма ограниченно-го сегмента литосферы. Разнообразие обстановок формирования сейсмогенеза и упорядоченный (в виде нескольких локализованных зон разных кинематических типов) характер его проявления послужили основанием для отказа от широко используемого определения "зона Вранча" в пользу обозначения ее как "область Вранча" [Вольфман, Колесникова, 2014].

Единого взгляда на строение и геодинамическую позицию области Вранча пока не выработано. Рассматриваются механизмы отрыва слэба океанической [Fodor et al., 1999; Wortel, Spakman, 2000 и др.] либо деламинации континентальной литосферы [Girbacea, Frisch, 1998; Koulakov et al., 2010 и др.] с интенсивным деформированием и выведением последней из горизонтального положения в субвертикальное. По нашему мнению, область Вранча представляет собой не петрологическое образование, а комбинацию деформированных зон, возникших *in situ* в результате всестороннего горизонтального сжатия, в том числе — вдавливания индентора микроплиты Тиссия–Дакия в образованный им Юго-восточный ороклин Карпат [Гинтов и др., 2015].

Черноморско-Кавказский регион

Кавказ и прилегающие территории (акватории) в структурном отношении представляет собой сложное мозаичное образование, в строении которого нашли отражение разные (коллизийные, дивергентные) геодинамические процессы и кинематические обстановки. Это проявилось и в особенностях сейсмогенеза: в регионе реализовались все типы деформационных режимов — от взбросового и сдвигового до

октаэдрического, и все типы кинематических обстановок — от меридионального сжатия до меридионального растяжения (или широтного сжатия), в том числе, диагонально ориентированные системы. К настоящему времени не выполнена детальная пространно-кинематическая идентификация сейсмогенных зон региона, хотя отдельные закономерности этого распределения вполне очевидны, например, преобладание в зоне Главного Кавказского надвига очагов, сформировавшихся в условиях взбросового и взбросо-сбросового деформационных режимов, обусловленных обстановками субмеридионального или юго-западного—северо-восточного сжатия. Некоторые результаты подобного анализа для сильных и катастрофических землетрясений региона приведены в работах [Рогожин, 2012; Рогожин и др., 2014 и др.].

Наибольшее влияние на процессы сейсмогенеза в регионе оказывали обстановки субмеридионального и юго-западного—северо-восточного сжатия. Анализируемая выборка, представленная очагами, сформированными в этих условиях, содержит 249 событий, что составляет более 71% от общего количества решений механизмов очагов для данного региона. При этом 76 землетрясений (31% от объема анализируемой выборки) было реализовано в условиях взбросового деформационного режима, 75

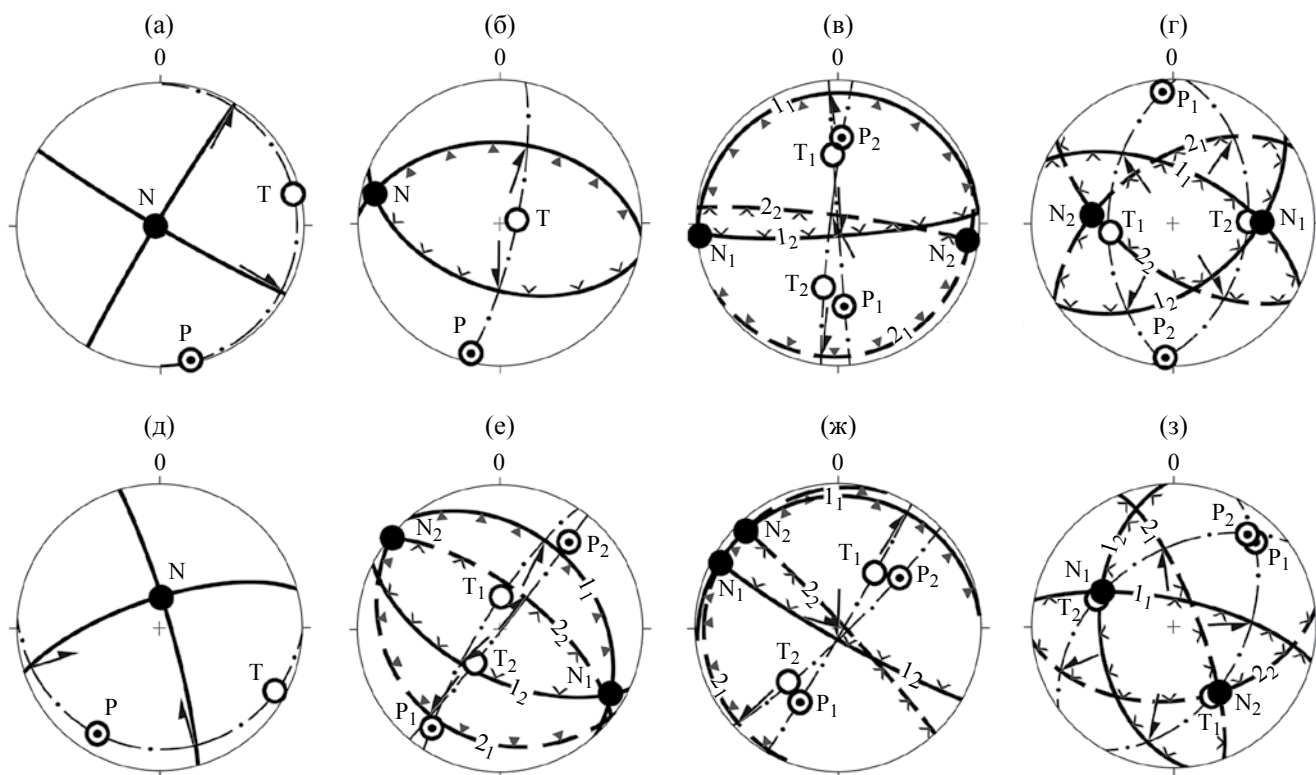


Рис. 5. Стереографические модели сейсмогенеза Черноморско-Кавказского региона, обусловленные обстановками субмеридионального (верхний ряд) и юго-западного—северо-восточного (нижний ряд) сжатия: а, д — сдвиговые; б, е — взбросовые; в, ж — взбросо-сбросовые; г, з — взбросо-сдвиговые. Индексы 1 и 2 соответствуют одной из парных моделей, проекции нодальных плоскостей которых показаны сплошной (1) либо пунктирной (2) линиями. Остальные условные обозначения см. рис. 3.

(30%) – сдвигового, 52 (21%) – взбросо-сбросового и 46 (18%) – взбросо-сдвигового деформационных режимов (см. рис. 2). Некоторые из построенных для региона моделей сейсмогенеза (рис. 5) вполне узнаваемы, так как во многом идентичны моделям соответствующих обстановок в Загросе и в области Вранча. В первую очередь это относится к сдвиговым очагам (см. рис. 5а, д), характерным также для системы Загрос (см. рис. 3а, в), и к взбросовым очагам (см. рис. 5б, е), аналогичные модели для которых получены как для Загроса (см. рис. 3б, г), так и для Вранча (см. рис. 4а, б). Кроме того, в пределах Черноморско-Кавказского региона установлены особенности сейсмогенеза, которые не проявились или слабо проявились в пределах ранее описанных сегментов Средиземноморского пояса.

Очаги взбросо-сбросового деформационного режима в Черноморско-Кавказском регионе играли более существенную роль, чем в пределах остальных рассматриваемых объектов. Полученные для каждой из кинематических обстановок (меридионального и юго-западного–северо-восточного сжатия) пары моделей являются симметричными антиподами друг друга (см. рис. 5в, ж), отражая особенности трансформаций первичного (взбросового) поля напряжений и/или его инверсию с разворотом тензора напряжений на 90° относительно оси N . Кстати сказать, подобное (симметричное относительно средней оси напряжений N) проявление взбросо-сбросового режима отмечалось и в единичных очагах землетрясений системы Загрос [Вольфман, 2013], а также при исследовании процессов разрывообразования (по зеркалам скольжения) в пределах Горного Крыма [Вольфман, 2015].

Модели взбросо-сдвигового типа сейсмогенеза (см. рис. 5г, з), на первый взгляд, являются более сложными и разнообразными, чем модели, сформированные в условиях взбросо-сбросовых режимов. Однако и в данном случае проявляется основное свойство сейсмогенерирующих полей напряжений: каждая из приведенных пар отражает симметричный характер трансформаций тензора напряжений относительно положения оси сжатия P . При этом происходит его разворот приблизительно на 90° таким образом, что проекции остальных осей (T и N) меняются местами. Аналогичная одной из этих моделей (см. рис. 5з) картина наблюдалась и в пределах системы Загрос [Вольфман, 2013]. Таким образом, базирующиеся на репрезентативном статистическом материале модели сейсмогенеза, формирующегося в условиях взбросо-сбросового и взбросо-сдвигового деформационных режимов, являются системным элементом сейсмического процесса не только для Черноморско-Кавказского региона, но и для других сегментов альпийского пояса.

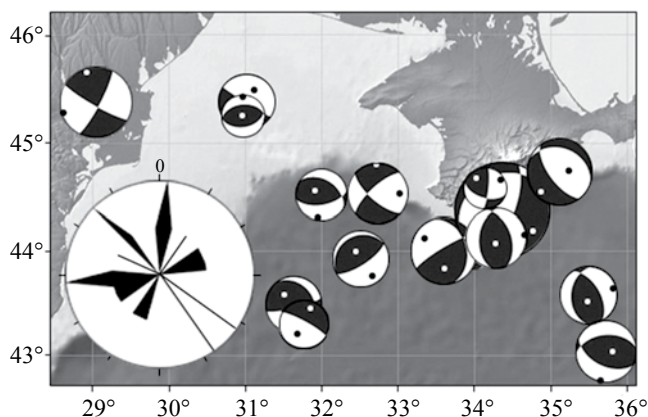


Рис. 6. Механизмы очагов и роза-диаграмма ориентировок осей сжатия для землетрясений Крымско-Черноморского региона (по [Пустовитенко, 2008]).

Акватория Черного моря

В решениях механизмов очагов черноморских землетрясений основными деформационными режимами являются взбросовые, в меньшей мере – взбросо-сбросовые, сбросовые и взбросо-сдвиговые [Пустовитенко, 1977, 2002; Пустовитенко, 2008, 2015 и др.]. Данная выборка (учитывая существенный разброс параметров в решениях механизмов очагов каждого типа) не является достаточной для корректного построения моделей сейсмогенеза. Однако и здесь направления главных осей структурообразующих полей напряжений подчиняются секторальному распределению, о чем свидетельствует роза-диаграмма ориентировок осей сжатия в очагах черноморских землетрясений (рис. 6). Следует особо отметить важное с геодинамической точки зрения обстоятельство: в решениях механизмов очагов землетрясений, локализованных вдоль континентального склона к югу от Горного Крыма, практически отсутствуют (за исключением одного-двух событий) такие, которые указывали бы на наличие субдукции, квазисубдукции или поддвига Черноморской плиты под континентальную кору.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных моделей сейсмогенеза показал, что рассматриваемые геодинамические системы находятся в состоянии неустойчивого равновесия, подвергаясь одновременному сжатию в разных направлениях. При этом их современные разрывные деформации, в частности сейсмогенные разрывы, как правило, отражают не суммированное влияние разных геодинамических факторов в виде некоего результирующего поля напряжений, а кратковременное преобладание воздействий какого-либо одного фактора над остальными.

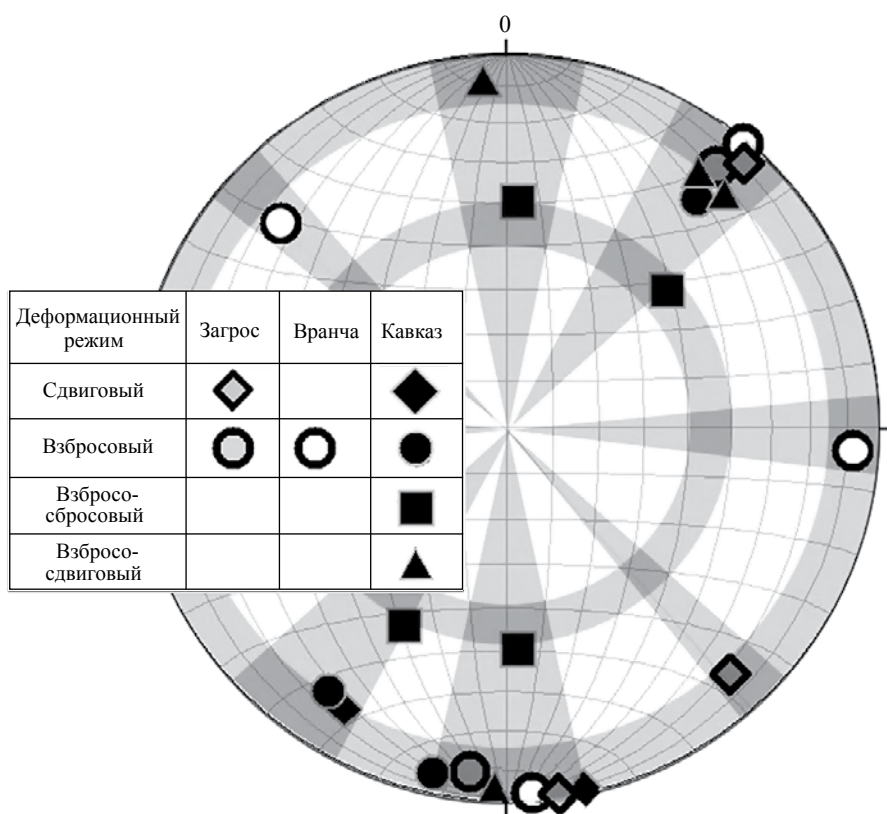


Рис. 7. Ориентировки осей сжатия в моделях сейсмогенеза исследуемых сегментов Средиземноморского складчатого пояса. Условные обозначения см. врезку.

Вторым важным следствием из вышеизложенного является установленная избирательность ориентировок главных осей полей напряжений, обуславливающих процессы сейсмогенеза. Она проявляется в том, что проекции осей сжатия разнотипных моделей на сводной стереограмме группируются в пределах четырех пар диаметрально противоположных секторов меридионального, широтного и диагональных направлений (рис. 7). Таким образом, речь идет о весьма динамичных, периодически меняющих свою конфигурацию (направление, тип деформационного режима) полях, сохраняющих при этом секторальное распределение ориентировок. Представляется совершенно необязательным и даже маловероятным условие, чтобы эти изменения происходили строго синхронно в пределах разных сегментов тектоносферы. Вероятнее всего, эти процессы носят волновой, циклический или даже спонтанный характер, определяемый либо внешними по отношению к изучаемым объектам причинами – изменениями ротационного режима Земли, лунно-солнечными приливами, либо региональными факторами – особенностями взаимодействия литосферных плит, неоднородностью, прочностными и реологическими свойствами геологической среды. Но в любом случае в процессе сейсмогенеза доминирующая

роль принадлежит полям напряжений, закономерно ориентированным относительно сторон света.

Вывод о вариативности и избирательности ориентировок полей напряжений относится и к процессам новейшего тектонического разрывообразования. Об этом свидетельствуют результаты тектонофизических исследований в пределах Горного Крыма, имевших целью идентификацию структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений (зеркал скольжения на стенках тектонических трещин) и реконструкцию условий их формирования [Вольфман, 2014, 2015]. В ходе этих исследований установлено, что проекции “активных” осей сжатия или растяжения (обуславливающих соответствующие обстановки в регионе) в моделях разных деформационных режимов на стереограмме также группируются в пределах четырех пар узких, диаметрально противоположных секторов меридиональной, широтной и диагональных ориентировок (рис. 8).

Дискретный характер сейсмогенного разрывообразования проявляется не только по латерали – в ориентировках проекций главных осей на горизонтальную плоскость, но и по вертикали – в преобладании определенных углов наклона осей напряжений к линии горизонта. Это устанавливается в сложных системах, образующихся

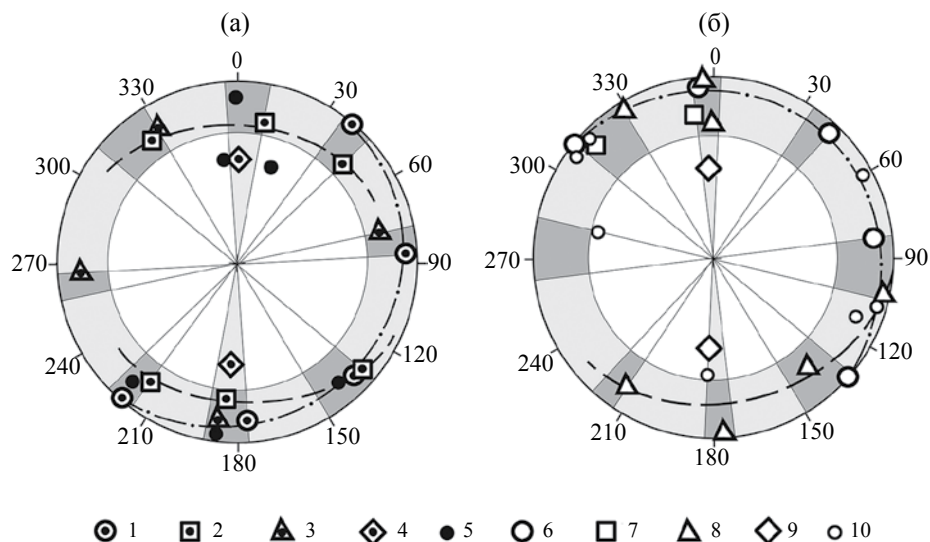


Рис. 8. Сводные стереограммы (верхняя полусфера) ориентировок главных осей напряжений (а – сжатия, б – растяжения) для кинематических обстановок, обусловивших процессы новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма (по [Вольфман, 2015]).

1–5 – проекции осей сжатия сдвиговых (1), взбросовых (2), взбросо-сдвиговых (3), взбросо-сбросовых (4) моделей деформационных режимов и структурно-кинематических парагенезисов одноосного сжатия (5); 6–10 – проекции осей растяжения сдвиговых (6), сбросо-сдвиговых (7), сбросовых (8), взбросо-сбросовых (9) моделей деформационных режимов и структурно-кинематических парагенезисов одноосного растяжения (10).

в результате трансформаций первичных (сдвигового или взбросового) полей напряжений. В качестве примера можно привести “парные” модели сейсмогенеза Черноморско-Кавказского региона для взбросо-сбросового (см. рис. 5в, ж) и взбросо-сдвигового (см. рис. 5г, з) деформационных режимов, в которых две главные оси меняются местами симметрично по отношению к третьей, сохраняя величину углов наклона в интервале 35–55°.

Проверить данное положение (исключив влияние интерпретационного фактора) можно на первичном статистически представительном материале. Репрезентативной является выборка решений механизмов очагов Черноморско-Кавказского региона, сформировавшихся в обстановках регионального сжатия. На стереограмме (рис. 9) отражено распределение осей сжатия в исходных, не интегрированных в модели, решениях механизмов очагов (более 350) взбросового, сдвигового, взбросо-сдвигового и взбросо-сбросового деформационных режимов. Это распределение весьма неоднородно: на фоне отсутствия или малых значений плотности осей сжатия выделяются контрастные аномалии изометрической или дугообразной формы. Сегменты вокруг северного и южного полюсов стереограммы – это области высоких концентраций осей сжатия субмеридионально ориентированных полей напряжений, доминирующих в регионе. В пределах этих сегментов переход от первичных (взбросовых или сдвиговых) деформационных режимов к взбросо-сбросовым завуалирован вследствие интенсивных локальных трансформаций

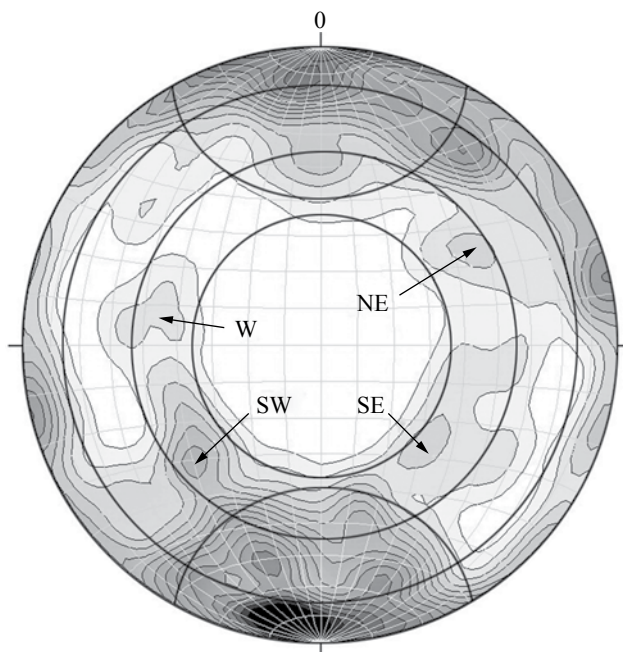


Рис. 9. Суммарное распределение проекций осей сжатия в очагах землетрясений Черноморско-Кавказского региона, обусловленных обстановками регионального сжатия.

Изолинии плотности – через 0.25% (0.25; 0.50; 0.75; 1.00; 1.25 ...; 4.0%).

поля напряжений, которые обусловили относительно постепенное уменьшение плотности осей сжатия по мере увеличения их углов наклона. В центральной части стереограммы проекции осей

сжатия отсутствуют — это поле их размещения для очагов сбросового и близких к нему деформационных режимов. Эти очаги формируются преимущественно в обстановках растяжения и не включены в данную выборку.

В пределах остального поля распределение имеет явно выраженный “поясной” характер. Первый пояс образуют концентрации осей сжатия вдоль внешней границы стереограммы. В тектонофизической интерпретации — это отражение обстановок горизонтального сжатия в условиях взбросового, сдвигового и взбросо-сдвигового деформационных режимов, когда углы наклона осей P к горизонту варьируют от 0° до $10 \div 15^\circ$. Подобный характер распределения вполне закономерен. Он отражает доминирующую роль первичных деформационных режимов, что нашло подтверждение как в моделях сейсмогенеза исследуемых объектов, так и в моделях новейшего разрывообразования в пределах Горного Крыма (см. рис. 7, 8).

Особый интерес представляют аномалии, образующие второй пояс, в пределах которого углы наклона осей P составляют $35\text{--}55^\circ$ (в среднем 45°). Объяснение этого феномена, по-видимому, можно обосновать особенностями хрупкого разрушения горного массива и последующей трансформацией его напряженно-деформированного состояния в результате сброшенных напряжений. Так, при анализе особенностей новейшего разрывообразования в Крыму и сейсмогенеза в пределах Загроса отмечалось, что в моделях сдвигового типа ориентировки осей сжатия ортогонального поля совпадают с направлениями максимальных касательных напряжений, соответствующих положению разрывов в системах иного — диагонального типа [Вольфман, 2013, 2014, 2015] и наоборот (см. рис. 3а, в, рис. 8). При этом угол разворота тензоров напряжений в горизонтальной плоскости относительно вертикальной (промежуточной) оси составляет приблизительно 45° . То есть, в процессе этих трансформаций плоскости касательных и нормальных напряжений меняются местами, что приводит к образованию новых (или активизации ранее сформированных) разрывов, ориентированных под углами 45° или 135° к положению исходной системы и удовлетворяющих параметрам измененного напряженно-деформированного состояния среды. Подобные особенности трансформирования структурообразующего поля характерны и для взбросовых деформационных режимов. В этом случае разворот тензора напряжений происходит в вертикальной плоскости относительно промежуточной горизонтальной оси (M) на величину, приблизительно равную 45° . В результате оси максимального и минимального сжатия (P и T) выводятся в наклонное положение ($35\text{--}55^\circ$), падая навстречу друг другу, что означает трансформацию взбросового режима в взбросо-сбросовый

(см. рис. 5в, ж). При этом сохраняется избирательность ориентировок осей сжатия относительно сторон света, характерная для систем напряжений первичных режимов, что проявляется в виде аномалий юго-западного (SW), юго-восточного (SE), северо-восточного (NE) и широтного (W) направлений (см. рис. 9). По-видимому, в природных геосистемах, подверженных релаксации и/или трансформации, такой механизм дискретного изменения ориентировок полей напряжений является наименее энергозатратным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из вышесказанного следует, что одним из фундаментальных свойств сейсмогенерирующих полей напряжений является дискретный характер их проявления как по отношению к сторонам света (или к оси вращения Земли), так и относительно земной (горизонтальной) поверхности. На это указывают особенности распределения параметров механизмов очагов землетрясений: а) высокая концентрация проекций осей сжатия в пределах относительно узких диаметрально противоположных секторов меридиональной, широтной и диагональных ориентировок; б) преобладание очагов, имеющих горизонтальные или (в меньшей мере) наклоненные под углом $35 \div 55^\circ$ оси сжатия. В обобщенном виде избирательный характер проявления полей напряжений, обусловивших процессы сейсмогенеза в пределах изученных сегментов Средиземноморского пояса, отражают стереограммы на рис. 7 и 9. В их поле выделены как радиальные сектора, в створе которых сосредоточены оси сжатия моделей сейсмогенеза, так и круговые интервалы $0\text{--}15^\circ$ и $(45 \pm 5 \div 10)^\circ$, аккумулирующие значительную часть проекций осей сжатия в решениях очагов землетрясений и соответствующих моделей (затенены светло-серым, см. рис. 7). Участки их пересечения (затенены темно-серым) можно рассматривать как наиболее вероятные области проявления высоких концентраций осей сжатия сейсмогенерирующих полей напряжений, характеризующие избирательность ориентировок последних как в плане, так и в разрезе. Многообразие обстановок сейсмогенеза, которое проявляется в разбросе параметров реальных решений механизмов очагов землетрясений, является следствием трансформаций полей напряжений, происходящих как на региональном, так и на локальном уровнях в зонах динамического влияния основных сейсмогенных структур исследуемых регионов, или обусловлено суперпозицией полей напряжений первого и второго уровней [Юнга, 1996] или порядков [Новик, Вольфман, 1997].

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 14-05-90411 и № 16-05-00996) и Минобрнауки РФ (тема НИР в рамках Госзадания РФ, № гос. регистрации 115052150069).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженов М.Л., Буртман В.С.* Структурные дуги альпийского пояса: Карпаты—Кавказ—Памир. М.: Наука, 1990. 167 с.
- Введенская А.В.* Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
- Вольфман Ю.М.* Способ построения стереографических моделей структурно-кинематических парагенезисов вторичных смещений вдоль тектонических разрывов // Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 г. Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2007. С. 179—184.
- Вольфман Ю.М.* Структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных зон системы Загроса (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Геофизический журнал. 2013. Т. 35. № 2. С. 38—64.
- Вольфман Ю.М.* Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма. Сообщение 1 // Геофизический журнал. 2014. Т. 36. № 6. С. 93—112.
- Вольфман Ю.М.* Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма. Сообщение 2 // Геофизический журнал. 2015. Т. 37. № 1. С. 100—120.
- Вольфман Ю.М., Гинтов О.Б., Колесникова Е.Я., Муровская А.В.* Тектонофизическая интерпретация механизмов очагов землетрясений системы Загрос // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. Вып. 1. С. 305—319.
- Вольфман Ю.М., Колесникова Е.Я.* Сейсмоструктура очаговой области Вранча // Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы // Материалы XIX научно-практической конференции с международным участием 7—10 октября 2014 г. / Под ред. Е.А. Рогожина, Л.И. Надежка. Воронеж: Издательско-полиграфический центр “Научная книга”, 2014. С. 85—89.
- Гинтов О.Б.* Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: Феникс, 2005. 572 с.
- Гинтов О.Б., Муровская А.В., Егорова Т.П. и др.* Глубинная сейсмогенная зона Вранча как индикатор геодинамического процесса // Геофизический журнал. 2015. Т. 37. № 3. С. 22—49.
- Гущенко О.И.* Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979а. С. 7—25.
- Гущенко О.И.* Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979б. С. 26—51.
- 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. Т. 312. № 4. С. 830—835.
- Зоненшайн Л.П., Деркур Ж., Казьмин В.Г. и др.* Эволюция Тетиса // История океана Тетис / Отв. ред. А.С. Монин, Л.П. Зоненшайн. М.: Изд-во Института океанологии им. П.П. Ширшова АН СССР, 1987. С. 104—115.
- Новик Н.Н., Вольфман Ю.М.* Эволюция планетарных полей напряжений в пределах сейсмоактивных регионов Украины, новейшие разрывы и разрывные смещения // Геодинамика Крымско-Черноморского региона. Симферополь: Изд-во ИГ НАНУ, КЭС, 1997. С. 81—90.
- Пустовитенко А.А.* Сейсмологические основы прогноза сейсмической опасности территории юга Украины / Автореф. дисс. ... канд-та физ.-мат. наук. Киев: ИГ НАНУ, 2008. 139 с.
- Пустовитенко А.А.* Каталог механизмов очагов землетрясений Крыма за 2009 г. // Землетрясения Северной Евразии в 2009 г. Приложение к сборнику на CD. М.: Наука, 2015.
- Пустовитенко Б.Г.* Тектонические напряжения в земной коре Крымского региона по данным об очагах слабых землетрясений // Геофизический сборник АН УССР. Вып. 78. 1977. С. 15—23.
- Пустовитенко Б.Г.* Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона последних 20 лет // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 г. Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”, 2002. С. 59—64.
- Рогожин Е.А.* Очерки региональной сейсмоструктуры. М.: ИФЗ РАН, 2012. 340 с.
- Рогожин Е.А., Овсяченко А.Н., Лутиков А.И. и др.* Эндеогенные опасности Большого Кавказа. М.: ИФЗ РАН, 2014. 256 с.
- Соллогуб В.Б., Чекунов А.В.* Принципиальные черты строения литосферы Украины // Геофизический журнал. 1985. Т. 7. № 6. С. 42—54.
- 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.
- Шебалин Н.В., Ибрагимов Р.Н., Чернов Ю.К. и др.* Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. Ташкент: Фан, 1986. 368 с.
- Широкова Е.И.* Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморско-Азиатского сейсмического пояса // Физика Земли. 1967. № 1. С. 22—36.
- Юнга С.Л.* Сейсмоструктурные деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии // Физика Земли. 1996. № 12. С. 37—58.

- Fodor L., Csontos L., Bada G. et al.* Tertiary tectonic evolution of the Pannonian basin system and neighbouring orogens: a new synthesis of paleostress data / Eds B. Durand et al. // *The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen* // Geol. Soc. of London Spec. Publ. The Geological Society, London. 1999. № 156. P. 295–334.
- Girbacea R., Frisch W.* Slab in the wrong place: lower lithospheric mantle delamination in the last stage of the Eastern Carpathian subduction retreat // *Geology*. 1998. V. 26. P. 611–614.
- Jackson J.A., Fitch T.J., McKenzie D.* Active thrusting and the evolution of the Zagros Fold Belt / Eds K.R. McClay, N.J. Price. Thrust and nappe tectonics // Geol. Soc. of London Spec. Publ. The Geological Society, London. 1981. № 9. P. 371–380.
- Jackson J.A., McKenzie D.* The Relationship Between Plate Motions and Seismic Moment Tensors, and the Rates of Active Deformation in the Mediterranean and Middle-East // *Geophys. Journ.* 1988. V. 93. P. 45–73.
- Jackson J.A., Haines A.J., Hoot W.E.* The accommodation of Arabia-Eurasia plate convergence in Iran // *J. Geophys. Res.* 1995. V. 100. P. 15205–15219.
- Koulakov I., Zaharia B., Enescu B. et al.* Delamination or slab detachment beneath Vrancea New arguments from local earthquake tomography // *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 2010. V. 11. № 3. Q03002, doi: 10.1029/g///c002811.
- McKenzie D., Dan P. Dan.* The relation between fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses // *Bull. Seism. Soc. Amer.* 1969. V. 59. № 2. P. 591–602.
- Wortel M., Spakman W.* Subduction and slab detachment in the Mediterranean-Carpathian region // *Science*. 2000. V. 290. P. 1910–1917.