

**ОБСТАНОВКИ СЕЙСМОГЕНЕЗА И ИХ ТРАНСФОРМАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА И ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЙ**

© Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я.

*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь*

*На примере Крымско-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; показано, что многообразие обстановок сейсмогенеза является следствием трансформаций полей напряжений, происходящих как на региональном, так и на локальном уровнях.*

**Ключевые слова:** сейсмогенез, поля напряжений, стереографические модели, механизмы очагов землетрясений, кинематические обстановки.

Сейсмическая активность Крымско-Черноморского региона обусловлена его геотектонической позицией: располагаясь на северном фланге Средиземноморского пояса, возникшего в результате коллизионного взаимодействия литосферных плит, Крымский полуостров и сопредельные районы выступают в роли своеобразного «демпфера», подвергаясь интенсивным тектоническим воздействиям, обусловившим относительно высокий уровень его сейсмичности. Магнитуды и вероятность возникновения сильных землетрясений здесь ниже, чем в пределах остальной части периферии Черного моря – на Кавказе, в Турции или Румынии. Тем не менее, за период проведения инструментальных наблюдений зарегистрировано более 3500 местных сейсмических событий, 31 из которых ощущалось населением полуострова. Основная часть их эпицентров приурочена к границам глубоководной Черноморской впадины, которые трассируются континентальным склоном параллельно береговой линии Крымского полуострова; сейсмическими процессами охвачена и центральная, ранее считавшаяся асейсмичной, глубоководная часть Черного моря.

Целями данной работы являлись: реконструкция кинематических обстановок и деформационных режимов проявлений сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона, анализ сейсмогенерирующих полей напряжений и их трансформаций в его пределах. Фактологической основой исследований послужили решения механизмов очагов землетрясений, представленные в [2-5 и др.] и полученные авторами в последние годы. Поскольку региональная выборка сейсмологических данных относительно немногочисленна (35 решений механизмов очагов) и, строго говоря, не является репрезентативной, концептуальную основу проведенного анализа составили закономерности проявления сейсмогенерирующих полей напряжений, установленные авторами при изучении близлежащих сегментов Средиземноморского пояса – Загроса, Вранча, Кавказа и прилегающих территорий (рис. 1).

Особенности сейсмогенеза этих регионов обоснованы результатами тектонофизического анализа, включающего: 1) унификацию систем напряжений в очагах, характеризуемых сходными деформационными режимами и кинематическими обстановками; 2) построение стереографических моделей основных типов сейсмогенеза; 3) анализ особенностей их пространственного распределения [6]. Совокупность очагов землетрясений с близкими значениями основных параметров (по сути, структурно-кинематический парагенезис сейсмогенных разрывов и смещений) при усреднении значений этих параметров рассматривалась в качестве стереографической модели соответствующего типа сейсмогенеза, а в случае закономерного или компактного расположения однотипных очагов – в качестве стереографической модели сейсмогенной зоны.

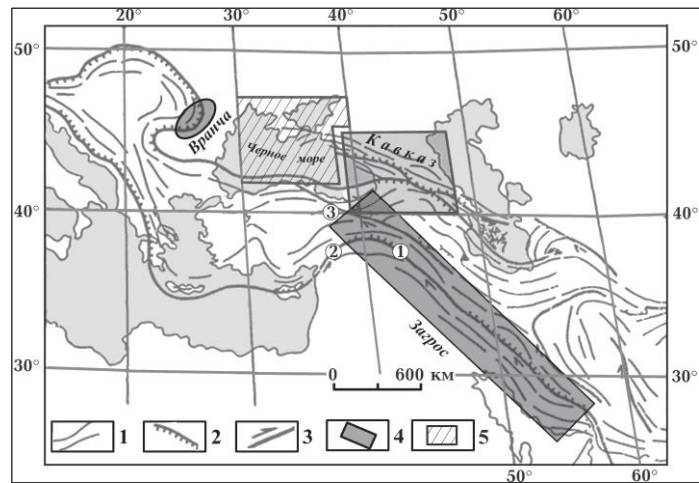


Рис. 1. Положение исследуемых объектов в системе Средиземноморского складчатого пояса (по [6])

Условные обозначения: 1 – простираение складок; 2 – надвиги, фронт шарьяжей; 3 – сдвиги; 4-5 – исследуемые объекты (названия на схеме), заштрихованный сегмент (5) – Крымско-Черноморский регион. Цифры в кружках – зоны региональных разломов: 1 – Загроса, 2 – Анатолийского, 3 – Северо-Анатолийского.

Исследования показали, что изученные геодинамические системы находятся в состоянии неустойчивого равновесия, подвергаясь одновременному сжатию в разных направлениях. При этом их современные деформации (сейсмогенные разрывы) зачастую отражают не суммированное влияние разных геодинамических факторов в виде некоего результирующего поля напряжений, а кратковременное преобладание воздействий какого-либо одного фактора над остальными. Также показано, что одним из основных свойств сейсмогенерирующих полей напряжений является их избирательный характер как по отношению к сторонам света (или к оси вращения Земли), так и относительно земной (горизонтальной) поверхности, что находит отражение в «секторальном» и «поясном» распределении ориентировок проекций осей сжатия и растяжения в моделях разных типов сейсмогенеза.

«Секторальный» характер обосновывается концентрацией проекций осей на стереограмме в пределах диаметрально противоположных секторов меридиональной, широтной и диагональных ориентировок, свидетельствуя о доминирующем влиянии на процессы сейсмогенеза тангенциальных напряжений, периодически изменяющих направление, но сохраняющих при этом избирательность ориентировок главных осей [5]. Эти изменения обусловлены либо внешними по отношению к изучаемым объектам причинами – изменениями ротационного режима Земли, лунно-солнечными приливами, либо региональными факторами – взаимовлиянием литосферных плит, неоднородностью, прочностными и реологическими свойствами геологической среды.

На «поясное» распределение указывают субгоризонтальное положение главных осей в моделях сдвигового и взбросового типов, а также – приуроченность этих осей (без нарушения секторальных ограничений) к поясу  $35\div 55^\circ$  в моделях сейсмогенеза, отражающих влияние трансформированных полей напряжений. Из этого следует, что в геосистемах основным (наименее энергозатратным) видом трансформации и/или релаксации напряжений является механизм, в соответствии с которым происходит разворот тензора вокруг промежуточной оси таким образом, что плоскости максимальных касательных и нормальных напряжений меняются местами.

Соответственно, получила обоснование дифференциация полей напряжений на «первичные» и «вторичные» («трансформированные»). К первой категории отнесены проявления сдвигового, взбросового и сбросового деформационных режимов (по

классификации [1]), поскольку в этих системах две главные оси ориентированы горизонтально, а третья – вертикально. Комбинаторные их сочетания в виде взбросо-сбросового<sup>1</sup>, взбросо-сдвигового и др. режимов, обеспечивающие многообразие проявлений сейсмогенеза, рассматриваются как следствия трансформаций первичного поля, обусловленных особенностями строения среды, характером релаксации напряжений в зонах динамического влияния активных разломов высокого ранга либо иными локальными причинами. Также было показано, что в разных кинематических обстановках различается роль главных осей напряжений – сжатия и растяжения, которые в кинематическом отношении являются одинаково значимыми (как оси максимального сжатия или минимального растяжения и наоборот), но которые совершенно неравнозначны с точки зрения их влияния на процессы структурообразования. Оси напряжений, предопределяющие характер кинематических обстановок сжатия или растяжения при реализации разрывов и смещений в условиях соответствующих деформационных режимов, обозначены, как «активные». Это относится ко всем режимам, в которых структурообразующая роль одной из осей является определяющей [6].

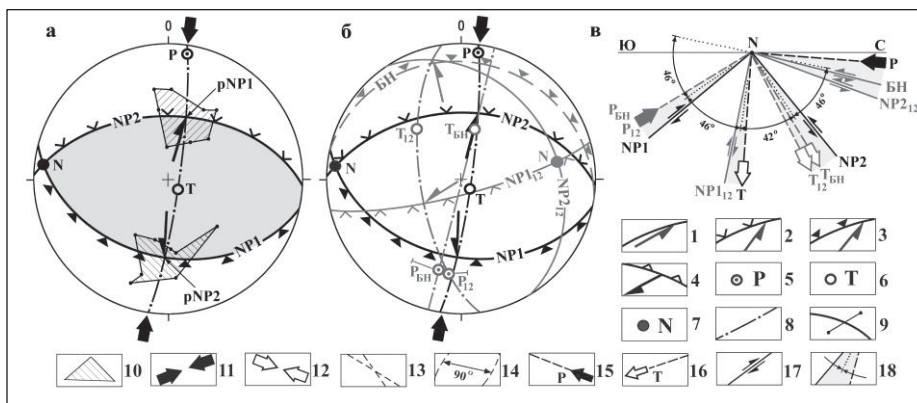


Рис. 2. Стереографическое отображение обстановок субмеридионального сжатия:

*a* – модель сейсмогенеза взбросового типа; *б*, *в* – соотношение (*б* – на стереограмме, *в* – на разрезе) параметров полученной модели и механизма взбросового очага с индексом «12», сформированного в трансформированном поле напряжений.

Условные обозначения. На стереограммах: 1-4 – проекции нодальных плоскостей и их структурно-кинематическая характеристика – сдвиги, взбросо- и сбросо-сдвиги (1), взбросы, сдвиго-взбросы (2), надвиги (3), сбросы, сдвиго-сбросы (4), бергитрихи со стороны падения плоскости, стрелки – направления перемещения лежащего крыла; 5-7 – проекции главных осей напряжений (5 – максимального сжатия, 6 – максимального растяжения, 7 – промежуточной); 8 – проекции плоскостей размещения главных осей нормальных напряжений; 9-10 – разброс значений одноименных параметров решений механизмов очагов в квазимоделях для двух (9) и более (10) аппроксимируемых событий; 11-12 – направления действия регионального сжатия (11) и растяжения (12); 13 – границы секторов регионального сжатия и растяжения в соответствующих квазимоделях; 14 – величина смещения параметров тензора напряжений в инверсионных обстановках. На разрезах: 15-17 – проекции на плоскость разреза осей сжатия (15), растяжения (16) и нодальных плоскостей с указанием направления перемещения вдоль них (17); 18 – сектора, образуемые сближенными проекциями осей напряжений и нодальных плоскостей (затенено), их биссектрисы и угловые расстояния между ними.

<sup>1</sup> Речь идет не о типе разрыва (поскольку «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  $\gamma^3 > 30^\circ$  [1]. Нодальные плоскости в очагах, формирующихся в условиях взбросо-сбросовых режимов, являются взбросами и надвигами (при углах наклона оси  $P$  в интервале  $30-45^\circ$ , обстановки сжатия) или сбросами (при углах наклона оси  $T$  в этом же интервале, обстановки растяжения).

В пределах Крымско-Черноморского региона пространственное распределение очагов указывает на повсеместное проявление разнообразных обстановок сейсмогенеза, с одной стороны, и на отсутствие приуроченности исключительно однотипных механизмов очагов к конкретным геоструктурным элементам – с другой.

Поскольку выборка решений механизмов очагов региона нерепрезентативна, способ построения моделей сейсмогенеза, примененный при анализе статистически представительных данных по Загросу, Вранча и Кавказу, в данном случае имеет некоторые ограничения. Тем не менее, при детальном рассмотрении однотипных (по условиям образования) очагов Крымско-Черноморского региона выявляется относительная близость значений их основных параметров. Результаты усреднения последних позволяют построить подобие стереографических моделей сейсмогенеза, которые, ввиду их статистической необеспеченности, можно обозначить как «квазимодели», полагая, что они в определенной мере отражают особенности сейсмогенирующих полей напряжений, но, в то же время, допуская уникальность каждого из очагов. Параметры тензоров напряжений всех квазимodelей, отражающих многообразие проявлений сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона, приведены в таблице; примеры стереографического отображения некоторых квазимodelей показаны на рис. 2 и 3.

Таблица

Параметры тензоров напряжений в квазимodelях сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона

Направление регионального сжатия или растяжения	Ориентировка осей напряжений (азимут/угол), град.			Тип режима и поля напряжений (п – первичное, т – трансформированное)
	<i>P</i>	<i>N</i>	<i>T</i>	
Обстановки регионального сжатия				
субмеридиональное	<i>08/06</i>	277/08	135/82	взбросовый (п)
	<i>188/30</i>	81/26	318/48	взбросовый (т)
	<i>200/10</i>	315/67	106/20	сдвиговый (п)
субширотное	<i>78/06</i>	346/15	188/74	взбросовый (п)
ЮВ-СЗ	<i>150/19</i>	60/02	323/73	взбросовый (п)
	<i>315/17</i>	216/20	80/64	взбросовый (т)
	<i>305/10</i>	46/47	208/46	взбросо-сдвиговый (т)
ЮЗ-СВ	<i>236/10</i>	140/38	341/47	взбросо-сдвиговый (т)
Обстановки регионального растяжения				
субмеридиональное	264/80	79/09	<i>170/01</i>	сбросовый (п)
	82/16	235/72	<i>352/07</i>	сдвиговый (п)
ЮВ-СЗ	263/62	28/17	<i>125/22</i>	сбросовый (п)
	134/54	29/11	<i>292/34</i>	взбросо-сбросовый (т)
ЮЗ-СВ	81/67	317/14	<i>223/18</i>	сбросовый (п)
	42/49	300/10	<i>202/39</i>	взбросо-сбросовый (т)

Примечание. Жирным курсивом выделены ориентировки «активных» осей напряжений, предопределивших тип кинематической обстановки формирования сейсмогенеза

Сопоставительный анализ результатов этих построений для большей части кинематических обстановок сейсмогенеза позволяет обосновать их соотношения в качестве индикаторов *трансформаций систем напряжений* (когда меняются местами плоскости максимальных касательных и нормальных напряжений или происходит некоторое изменение тензора напряжений по сравнению с квазимodelями) и *инверсий кинематических обстановок* (в случаях, когда оси регионального сжатия и растяжения меняются местами). Под инверсией в данном случае понимается не одномоментное изменение характера обстановок на противоположный (поскольку отследить эти превращения не представляется возможным), а констатация факта взаимозаменяемости положения осей сжатия и растяжения в соответствующих обстановках. Наглядным примером этого служат квазимodelи-антиподы, характеризующие особенности

проявлений регионального сейсмогенеза в условиях субмеридионального сжатия (рис. 2а) и растяжения (рис. 3а).

Особенности трансформаций систем напряжений можно проиллюстрировать на примере проявлений взбросовых типов сейсмогенеза, обусловленных обстановками регионального субмеридионального сжатия (рис. 2), и квазимodelей сбросового и взбросо-сбросового типов, сформировавшихся в условиях юго-восточного–северо-западного растяжения (рис. 3). В первом случае видно, что элементы решения одного из очагов (на рис. 2б – с индексом «12») явно «выпадают» из общего распределения. В то же время, его проекции осей сжатия и растяжения на стереограмме расположены в непосредственной близости от нодальных плоскостей квазимodelи взбросового типа и наоборот. Поскольку обе оси сжатия ориентированы меридионально ( $8^\circ$  и  $188^\circ$ ), а промежуточная ось – субширотно, допустимо предположить, что в данном очаге система напряжений претерпела трансформацию по отношению к первичному полю (горизонтального сжатия). Это показано на совмещенном меридионально ориентированном разрезе (рис. 2в), где нодальные плоскости очага с индексом «12» почти совпадают с направлением осей сжатия и растяжения полученной квазимodelи и наоборот, образуя сектора в  $(10 \pm 4)^\circ$ . При этом угловое расстояние между центрами секторов составляет  $(45 \pm 3)^\circ$ , а угол разворота системы против часовой стрелки вокруг промежуточной оси оценивается в  $35 \div 40^\circ$ , указывая на то, что в результате локальной трансформации поля в очаге с индексом «12» направления действия нормальных и максимальных касательных напряжений поменялись местами.

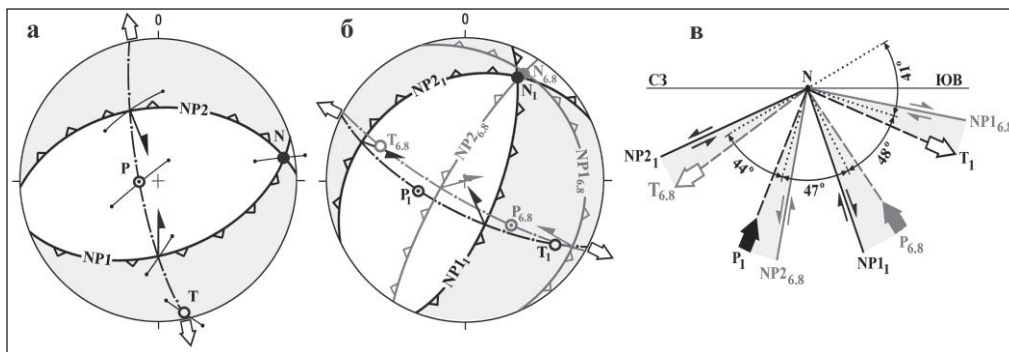


Рис. 3. Результаты аппроксимации кинематических обстановок субмеридионального растяжения (а); механизмы очагов сбросового (показан черным, с индексом «1») и взбросо-сбросового (показан серым, с индексом «6,8») типов, сформировавшихся в условиях юго-восточного–северо-западного растяжения (б) и соотношение в разрезе проекций их нодальных плоскостей и главных осей напряжений (в).

Условные обозначения см. на рисунке 2

Второй пример (рис. 3 б, в) показывает соотношение проекций нодальных плоскостей и главных осей напряжений в очагах сбросового и взбросо-сбросового типов, обусловленных обстановками юго-восточного–северо-западного растяжения. В этих условиях было реализовано самое сильное за последние 100 лет землетрясение в регионе (11.09.1927 г.,  $M=6.9$ ), вызвавшее разрушения на Южном берегу Крыма и послужившее причиной создания Крымской сети сейсмологических наблюдений. Интенсивность события позволяет (с некоторой долей условности) считать параметры решения механизма его очага максимально приближенными к «эталонным» для землетрясений со сбросовым деформационным режимом, сформировавшихся в данной обстановке (на рис. 3 б, в показано черным с индексом «1»). Этой же обстановке отвечает и квазимodelь взбросо-сбросового типа (на рис. 3 б, в – с индексом «6,8»). На условия растяжения в аппроксимируемых этой квазимodelью очагах указывает структурно-кинематическая идентификация ее разрывов в качестве сброса и правого сдвига-сброса.



Соотношение параметров в очагах со сбросовым (первичным) и взбросо-сбросовыми деформационными режимами таково, что оси сжатия и растяжения первой квазимодели расположены вблизи проекций нодальных плоскостей второй, и наоборот. При этом положение промежуточной оси  $N$  в обоих случаях практически одинаково, отличаясь всего на  $5\div 6^\circ$  (рис. 3б). На разрезе, перпендикулярном оси  $N$ , разница между углами падения расположенных попарно проекций осей напряжений и нодальных плоскостей составляет  $(12\pm 3)^\circ$ , а угол между серединами образуемых ими секторов –  $(45\pm 4)^\circ$  (рис. 3в), что указывает на возможность трансформации сбросового сейсмогенерирующего поля во взбросо-сбросовое путем поворота тензора напряжений на  $45^\circ$  вокруг промежуточной оси. Аналогичные соотношения установлены для всех кинематических обстановок, в которых идентифицированы проявления сейсмогенеза (квазимодели), обусловленные первичными и трансформированными полями напряжений.

Анализ кинематических обстановок и деформационных режимов регионального сейсмогенеза показал, что избирательный характер ориентировок полей напряжений, установленный в пределах ранее изученных сегментов Средиземноморского пояса, также нашел отражение и в Крымско-Черноморском регионе. В первую очередь это выражается в секторальном распределении ориентировок «активных» осей сжатия (рис. 4а) и растяжения (рис. 4б) как в обобщающих построениях, так и в решениях отдельных механизмов очагов, не включенных в состав квазимodelей.

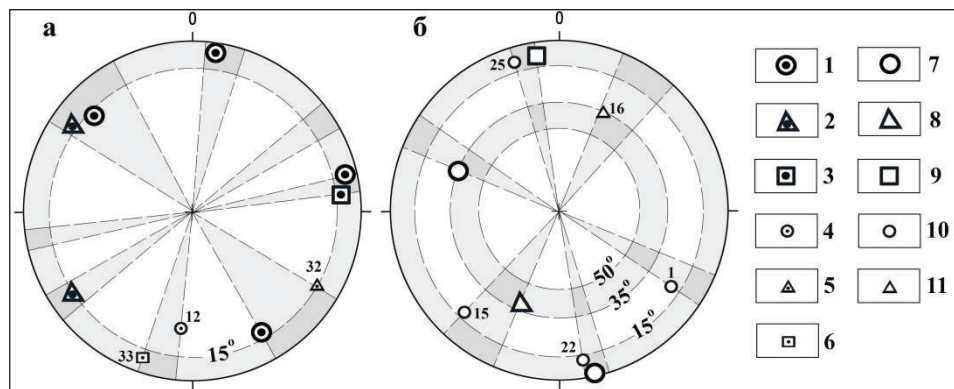


Рис. 4. Распределение ориентировок «активных» осей напряжений: а – осей  $P$  в квазимоделях сейсмогенеза и в решениях отдельных механизмов очагов, отражающих обстановки регионального сжатия; б – осей  $T$  в квазимоделях сейсмогенеза и в решениях отдельных механизмов очагов, сформировавшихся в обстановках растяжения

Условные обозначения: 1-3 – проекции осей  $P$  в квазимоделях взбросового (1), взбросо-сдвигового (2) и сдвигового (3) деформационных режимов; 4-6 – то же самое, соответственно для отдельных очагов (номера указаны цифрами); 7-9 – проекции осей  $T$  в очагах сбросового (7), взбросо-сбросового (8) и сдвигового (9) типов; 10-11 – то же самое, соответственно для отдельных очагов; затенены сектора и пояса локализации осей  $P$  и  $T$  на стереограмме.

Стереограмма (рис. 4 б) указывает также на «поясной» характер распределения проекций осей растяжения: к поясу  $35\div 50^\circ$  приурочены проекции осей в проявлениях сейсмогенеза (квазимоделях и отдельных очагах), возникновение которых происходило преимущественно в условиях трансформированных систем напряжений.

Инверсионный характер полей напряжений предопределил закономерности сейсмогенного разрывообразования в регионе, установленные по соотношению ориентировок «активных» осей и положению нодальных плоскостей в проявлениях сейсмогенеза, обусловленных влиянием сжимающих и растягивающих напряжений, периодически действующих в одном направлении. На совмещенных стереограммах и разрезах (рис. 5) показано, что в результате воздействия инверсионных первичных полей напряжений наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов являются одни и те же сегменты (сектора) разрезов, соответствующие направлениям

действия максимальных касательных напряжений в земной коре. Это обстоятельство предопределило особенности деформирования геологической среды в условиях горизонтального сжатия и растяжения: в обоих случаях образуются (активизируются) преимущественно плоскости одних и тех же систем разрывов, при этом в обстановках сжатия они проявляются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения (рис. 5 б, г, ж).

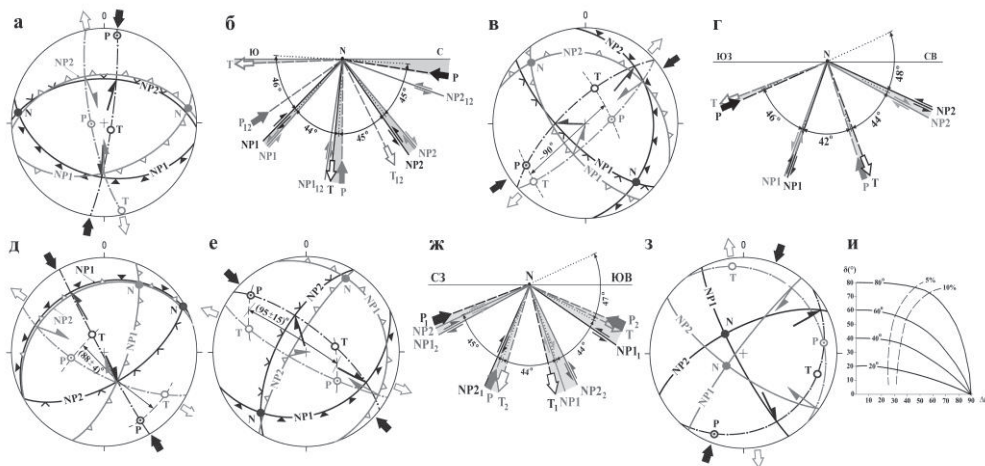


Рис. 5. Соотношение (на стереограммах и сводных разрезах) проекций основных осей ( $P$ ,  $T$ ) и нодальных плоскостей в проявлениях сейсмогенеза взбросового и сбросового типов (а-ж), отражающих наличие инверсии кинематических обстановок сжатия (показаны черным) и растяжения (показаны серым) в направлениях:

а, б – субмеридиональном; в, г – юго-западном–северо-восточном; д-ж – юго-восточном–северо-западном; з – проявления сдвигового типа для обстановок ортогонального сжатия и растяжения; и – номограмма изменения наклонов проекций для плоскостей с разными углами падения ( $\beta$ ) при различных их отклонениях ( $\alpha$ ) от положения, перпендикулярного к линии разреза. Пояснения – в тексте; условные обозначения см. на рисунке 2

Таким образом, показано, что разнообразие проявлений сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона обусловлено влиянием различных кинематических обстановок, проявившихся в виде разноориентированных систем тектонических напряжений и их трансформаций, характеризующихся, в то же время, избирательностью ориентировок главных осей как по отношению к сторонам света (к оси вращения Земли), так и относительно земной (горизонтальной) поверхности.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 16-05-00996.

## Литература

1. Гуценко О.И., Мострюков А.О., Петров В.А. Структура поля современного регионального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса // Докл. АН СССР, 1991. № 4. С. 830–835.
2. Землетрясение 10 декабря 2012 г. с  $M_w = 4.6$  с вблизи г. Анапы / И.П. Габсатарова, Л.С. Малянова, Е.А. Селиванова, В.Н. Якушева // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 г. Севастополь: НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизик», 2013. С. 35–45.
3. Пустовитенко А.А. Сейсмологические основы прогноза сейсмической опасности территории юга Украины: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 04.00.22. Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН У. Киев, 2008. 139 с.
4. Пустовитенко Б.Г. Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона последних 20 лет // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. Севастополь: НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. С. 59–64.

5. *Пустовитенко Б.Г.* Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма: дис. ... докт. физ.-мат. наук: 04.00.22. Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины. Киев, 2003. 387 с.
6. Selective Manifestation of Sismogenic Stress Field within the Mediterranean Belt (Based on Earthquake Focal Mechanism Solutions) / *Yu.M. Volfman, E.Ya. Kolesnikova, B.G. Pustovitenko, V.K. Milyukov* // Journal of Volcanology and Seismology, 2017. Vol. 11. No. 6. P. 447–461.