Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского.

География. Геология. Том 4 (70). № 4. 2018 г. С. 206–250.

УДК 550.348

ОБСТАНОВКИ СЕЙСМОГЕНЕЗА

КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

(ПО ДАННЫМ РЕШЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ)

Вольфман Ю. М., Пустовитенко Б. Г., Колесникова Е. Я., Останин А. М.

Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия E-mail: <u>seism.volf@gmail.com</u>

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.

введение

В течение последних 30-40 лет в научном сообществе ведутся активные дискуссии относительно строения и геодинамического развития Крымско-Черноморского региона [1, 2 и др.]. Поскольку доминирующее влияние тангенциальных (горизонтально ориентированных) напряжений на процессы структурообразования в земной коре уже практически не оспаривается, основными объектами обсуждения являются характер преобладающих типов разрывных деформаций и их роль в структуре региона, а также обстановки их формирования и геодинамические предпосылки возникновения последних. При этом подходы исследователей (зачастую альтернативные) нередко находят отражение в прогностических моделях различного целевого назначения, что переводит теоретическую дискуссию в практическую плоскость, существенным образом влияя на результаты прогнозных исследований. Весьма наглядно это проявляется в расхождении взглядов на природу и структурно-кинематические особенности сейсмогенных зон региона, обусловливая соответствующий этим взглядам характер рекомендаций по защите населения, зданий и сооружений от воздействия сильных и разрушительных землетрясений [3-6 и др.]. Сложившаяся ситуация предопределила актуальность изучения процессов сейсмогенного разрывообразования в пределах Крымско-Черноморского региона посредством структурно-кинематического анализа их проявлений в виде прямых признаков, получивших отражение в решениях механизмов очагов землетрясений. Соответственно, основными задачами данной работы являлись: реконструкция кинематических обстановок И деформационных режимов проявлений сейсмогенеза в пределах региона, анализ сейсмогенерирующих полей напряжений и их возможных трансформаций в очагах землетрясений разных типов.

1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ

Сейсмическая активность Крымско-Черноморского региона обусловлена его геотектонической позицией и внутренним строением. Располагаясь на северном фланге альпийского Средиземноморского пояса, возникшего в результате коллизионного взаимодействия крупных литосферных плит и субплит, Крымский полуостров и сопредельные районы выступают в роли своеобразного «демпфера», подвергаясь интенсивным тектоническим воздействиям, обусловившим относительно высокий уровень сейсмичности региона. Основная часть очагов землетрясений приурочена к границам глубоководной Черноморской впадины, которые трассируются континентальным склоном параллельно береговой линии Крымского полуострова и Кавказа. Сейсмическими процессами охвачена также центральная, ранее считавшаяся асейсмичной, глубоководная часть Черного моря [7, 8]. Энергетический потенциал региона ниже, а период повторяемости сильных и катастрофических землетрясений больше, чем в пределах остальной части периферии Черного моря – на Кавказе, в Турции или Румынии. Это обстоятельство существенным образом сказалось как на репрезентативности полученной выборки данных по решениям механизмов очагов, так и на фактологическом наполнении самих решений ввиду ограниченной (по вполне объективным и объяснимым причинам) возможности регистрации необходимого количества первых вступлений сейсмических волн от землетрясений с относительно невысокими магнитудами. Таким образом, в обработке изначально было задействовано 31 решение механизмов очагов (по состоянию на 01.06.2017 г., Табл. 1), которые получены крымскими сейсмологами [7, 9–18] и специалистами ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН» [19]. После указанной даты опубликованы решения еще по 4-м очагам [20, 21] (в Табл. 1 – №№32–35), а также в процессе выполнения данной работы уточнены параметры механизма очага №31, которые использовались либо как верификационные элементы, либо привлекались к построению моделей, на что указано при описании соответствующих обстановок сейсмогенеза.

Все решения механизмов очагов получены по знакам первых вступлений продольных сейсмических волн в рамках дислокационной модели [22]. В отличие от перечисленных опубликованных данных в общепринятом формате, в таблице 1 параметры двух нодальных плоскостей NP1, NP2 даны не по азимуту простирания, а по азимуту падения NP и углу падения DP (для краткости обозначено NP/DP, или в тексте – $NP \angle DP$). На рисунках (схемах), иллюстрирующих те или иные кинематические обстановки, приведены проекции нодальных плоскостей по простиранию с указанием направления и угла падения, а также указана их принадлежность к тому или иному структурно-кинематическому типу.

Таблица 1.

Параметры механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона

					Mw	Нодальные		Оси			Леф
№	Дата	Координаты очага				плоскости		главных напря:		жений	режим
		φ°N	λ°E	Н, <i>КМ</i>		NP1/DP	NP2/DP	P/PL	N/PL	1/PL	-
1	11.09.1927	44.3	34.3	15	6.9	111/69	334/28	263/62	28/17	125/22	Сб
2	12.07.1966	44.7	37.3	55	5.8	165/43	308/53	325/05	233/19	69/70	В
3	22.07.1972	44.8	37.2	19	4.5	102/62	4/74	325/08	68/57	230/32	В-сд
4	06.08.1972	44.6	32.7	15	4.7	318/72	221/69	90/28	265/62	359/02	Сд
5	20.02.1973	45.03	36.52	25	4.5	324/19	210/82	50/50	298/18	195/35	В-сб
6*	1955-1975	44.2	34.2	15	2.5	75/15	301/80	134/54	29/11	292/34	В-сб
7*	1955-1975	44.5	34.3	5	2.5	153/20	290/75	301/29	204/13	92/58	В
8*	1955-1975	44.7	34.8	20	2.5	75/15	301/80	134/54	29/11	292/34	В-сб
9	17.04.1975	43.83	32.44	46	4.2	330/18	146/72	147/27	57/01	325/63	В
10	03.09.1978	44.4	38.0	20	5.8	222/70	87/27	236/23	139/18	14/60	В
11	13.11.1981	45.27	29.01	11	5.1	118/81	210/82	254/01	159/78	344/12	Сд
12	03.03.1986	43.52	31.69	18	4.3	166/80	58/29	188/30	81/26	318/48	В
13	02.04.1988	44.98	32.01	13	4.2	170/58	32/40	188/10	94/22	301/66	В
14	02.07.1990	44.77	34.55	17	4.3	183/59	311/44	160/08	254/28	55/61	В
15	16.08.1990	44.7	35.06	28	4.9	234/65	22/29	81/67	317/14	223/18	Сб
16	25.07.1991	43.12	31.3	11	4.0	181/11	29/80	215/55	118/05	24/35	В-сб
17	27.08.1992	44.72	37.44	24	4.6	225/35	355/66	14/17	277/23	136/61	В
18	29.03.1992	45.3	31.0	33	4.3	212/87	353/04	35/48	302/02	210/42	В-сб
19	22.11.1996	44.51	34.16	10	3.2	97/79	195/54	61/16	173/52	320/34	В-сд
20	09.06.1997	43.31	35.85	22	4.6	206/50	356/44	192/03	283/15	91/74	В
21	18.10.1998	44.05	33.68	22	4.9	329/81	73/33	304/29	53/32	181/45	В-сд
22	08.08.1999	44.71	37.71	37	3.8	182/57	348/34	27/77	268/07	176/12	Сб
23	04.03.2001	43.6	35.37	20	4.7	274/39	60/56	71/09	342/17	192/71	В
24	09.11.2002	44.82	37.7	29	5.6	330/50	82/66	113/10	14/41	213/48	В-сд
25	13.03.2005	44.72	37.14	6	4.4	134/41	8/59	240/59	78/29	344/08	Сб
26	07.05.2008	45.34	30.95	11	4.8	171/45	353/45	325/00	82/01	262/89	В
27	12.04.2009	44.16	34.23	20	4.3	276/45	70/48	82/02	352/13	181/76	В
28	05.10.2007	44.56	37.08	18	4.3	215/55	11/38	205/09	297/12	78/75	В
29	17.03.2011	43.39	36.13	31	4.1	209/28	16/63	20/18	289/05	183/71	В
30	10.12.2012	44.83	37.54	24	4.6	202/84	105/37	232/30	117/36	350/39	В-сд
31	15.10.2013	44.53	34.35	7	3.7	121/55	271/38	108/09	200/15	350/72	В
32	05.07.1984	44.49	34.46	18	4.3	154/71	262/49	122/13	225/43	19/44	В-сд
33	13.05.2016	44.63	34.41	13	3.5	242/83	334/68	200/10	315/67	106/20	Сд
34	28.06.2016	42.46	31.59	35	4.1	155/54	338/36	156/09	66/02	325/81	В
35	22.07.2016	42.35	34.95	25	4.2	356/48	212/48	14/00	284/19	104/71	В

Вольфман Ю. М., Пустовитенко Б. Г., Колесникова Е. Я., Останин А. М.

Примечание: Сб – Сбросовый; В–Взбросовый; Сд –Сдвиговый; В-сд – Взбросо-сдвиговый; В-сб – Взбросо-сбросовый; * – усредненный для локальных групп очагов [13].

Исследуемые очаги рассредоточены в полосе широт $\phi = 42 \div 46^{\circ}$ N – от прибрежной части Северной Добруджи на западе до района Тамани на востоке. Большая их часть тяготеет к области континентального склона южнее Крымского

полуострова и к зоне сочленения Индоло-Кубанского прогиба с Туапсинской впадиной. В меньшем количестве получены решения механизмов для землетрясений, локализованных в пределах юго-западного шельфа Черного моря, в Западно-Черноморской впадине и в районе Центрально-Черноморского поднятия (вал Андрусова). Пространственное распределение очагов в пределах Крымско-Черноморского региона указывает на повсеместное проявление разнообразных обстановок сейсмогенеза, с одной стороны, и на отсутствие приуроченности исключительно однотипных механизмов очагов к конкретным геоструктурным элементам – с другой (Рис. 1).



Рис 1. Схема размещения очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона, для которых получены решения механизмов очагов землетрясений (по [9] с дополнениями). Затемнены (здесь и далее) области волн сжатия, черная и белая точки – проекции осей Р и Т соответственно.

Поскольку региональная выборка сейсмологических данных, строго говоря, не является статистически представительной, концептуальную основу проведенного анализа составили закономерности проявления сейсмогенерирующих полей напряжений, установленные при изучении близлежащих сегментов Средиземноморского пояса – Загроса, Вранча, Кавказа и прилегающих территорий [23–25]. Особенности сейсмогенеза этих регионов были обоснованы результатами структурно-кинематического анализа статистически представительных данных по решениям механизмов очагов землетрясений. Алгоритм этого анализа предполагал

последовательность выполнения следующих операций: унификация систем напряжений в очагах, характеризуемых сходными деформационными режимами и кинематическими обстановками, --> построение стереографических моделей основных типов сейсмогенеза — пространственный анализ их распределения. Совокупность очагов землетрясений с близкими значениями основных параметров (по сути, структурно-кинематический парагенезис сейсмогенных разрывов и смешений) 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 [23]. Для дифференциации очагов по типам деформационных режимов применялась классификация [26, 27], основанная на принятых в тектонофизике параметрах – углах наклона к горизонту γ^{l} , γ^{2} и γ^{3} главных осей нормальных напряжений *P*, *T* и *N*, соответственно. Взбросовый, сбросовый и сдвиговый режимы и обусловившие их поля напряжений, в которых две главные оси ориентированы горизонтально, а третья – вертикально, отнесены к разряду первичных (нетрансформированных). Комбинаторные их проявления в виде взбросо-сбросового¹, взбросо-сдвигового и т. п. деформационных режимов рассматриваются как следствия тех или иных локальных трансформаций первичного поля, обусловленных особенностями строения среды, характером релаксации напряжений в зонах динамического влияния активных разломов высокого ранга либо иными причинами.

Результаты исследований пределах в указанных сегментов Средиземноморского пояса показали, что данные геодинамические системы находится в состоянии неустойчивого равновесия, подвергаясь влиянию различных кинематических обстановок сжатия и растяжения, действующих в разных направлениях. При этом их современные деформации (сейсмогенные разрывы), как правило, отражают не суммарное влияние разных геодинамических факторов в виде некоего результирующего поля напряжений, а кратковременное преобладание воздействий какого-либо одного фактора над остальными. Также установлено, 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 [25].

«Секторальный» характер обосновывается концентрацией проекций осей на стереограмме в пределах диаметрально противоположных секторов меридиональной, широтной и диагональных ориентировок (Рис. 2), свидетельствуя о доминирующем влиянии на процессы сейсмогенеза тангенциальных напряжений,

¹ 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 $\gamma^3 > 30^\circ$ [27]. Нодальные плоскости в очагах, формирующихся в условиях взбросо-сбросовых режимов, являются взбросами и надвигами (при углах наклона оси *P* в интервале 30–45°, обстановки сжатия) или сбросами (при углах наклона оси *T* в этом же интервале, обстановки растяжения).



периодически изменяющих направление, но сохраняющих при этом избирательность ориентировок главных осей [25]. Эти изменения обусловлены либо внешними по отношению к изучаемым объектам причинами – вариациями ротационного режима Земли, лунно-солнечными приливами, либо региональными факторами – взаимовлиянием литосферных плит, неоднородностью, прочностными и реологическими свойствами геологической среды.



Рис 2. Ориентировки осей сжатия в моделях сейсмогенеза исследуемых сегментов Средиземноморского складчатого пояса (по [25]). Условные обозначения – на врезке.

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 (по-видимому, 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.

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, были обозначены как «активные» [25].

Поскольку региональная выборка данных по Крымско-Черноморскому региону относительно немногочисленна, методология построения моделей сейсмогенеза,

положенная в основу анализа статистически представительных выборок данных по Загросу, Вранча и Кавказу, в данном случае имеет некоторые ограничения. Тем не менее, при детальном рассмотрении однотипных (по условиям образования) решений механизмов очагов Крымско-Черноморского региона выявляются некоторое сходство между ними и относительная близость значений их основных параметров. Результаты обобщения и усреднения последних позволили построить подобие стереографических моделей сейсмогенеза (по аналогии с другими регионами), которые, ввиду их статистической необеспеченности, можно обозначить как «субмодели» или «квазимодели», полагая, что они в определенной мере отражают основные особенности сейсмогенерирующих полей напряжений, но, в то же время, допуская уникальность характеристик каждого из очагов.

В решениях механизмов очагов Крымско-Черноморского региона нашли отражение различные условия формирования сейсмогенеза. В имеющейся выборке 23 очага отражают кинематические обстановки сжатия, действующего в разных направлениях. Сдвиговые очаги (№ 4, 11, 33 в Табл. 1 (Чтобы не перегружать изложенное, при ссылке на то или иное землетрясение из данного каталога будет приведен только его порядковый номер в Табл. 1 без указания даты события и его остальных параметров (если таковые не являются предметом специального рассмотрения)) сформировались в обстановках ортогонального сжатия или растяжения. Остальные 9 механизмов (4 – сбросового и 5 – взбросо-сбросового деформационных режимов) свидетельствуют о наличии условий регионального растяжения.

2. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК СЖАТИЯ

Очаги землетрясений, сформированные в обстановке субмеридионального сжатия, в количественном отношении доминируют в регионе. Они распространены практически повсеместно и характеризуются преимущественно взбросовым деформационным режимом (Рис. 3). Для построения квазимодели данного типа сейсмогенеза использованы решения механизмов очагов 7-ми землетрясений (№№13, 14, 17, 20, 26, 28 и 29 в Табл. 1), значения параметров которых образуют на стереограмме относительно компактные скопления (Рис. 4*a*). Проекции главных осей очага №12 «выпадают» из этого распределения; его решение не было использовано при построении, несмотря на то, что ось сжатия *P* ориентирована в меридиональном направлении (188∠30°). При анализе этот очаг рассматривался в контексте возможных трансформаций сейсмогенерирующего поля напряжений (Рис. 4*б*, *в*). Данные по землетрясению 22.07.2016 г. (№35) были опубликованы после построения данной квазимодели [21], поэтому они были использованы в качестве верификационного элемента.



Рис. 3. Распределение очагов землетрясений, обусловленных обстановками субмеридионального сжатия, и структурно-кинематические характеристики их нодальных плоскостей. Условные обозначения (для этой и последующих схем распределения очагов, обусловленных разными обстановками – на Рис. 5, 7 и т. д.): 1–5 – эпицентры очагов взбросового (1), взбросо-сдвигового (2), сдвигового (3), сбросового (4) и взбросо-сбросового (5) типов и их номера в Табл. 1; 6–7 – направления сжатия (6) и растяжения (7) в момент землетрясения; 8–11 – проекции нодальных плоскостей на горизонтальную поверхность, их номера, углы падения и структурно-кинематические характеристики (8 – взбросы, 9 – надвиги, 10 – сдвиги и направления перемещения вдоль них, 11 – сбросы); 12 – вероятное направление разрыва в очаге, установленное с использованием азимутальных годографов *P*-волн (по данным [17, 28]). Примечание: а) бергитрихи – со стороны висячего крыла разрыва; б) положение очага №33 снесено по стрелке.

Поскольку, согласно методике исследования напряжений и разрывов в очагах [22], в решениях их механизмов направления осей *P* и *T* являются производными от элементов залегания нодальных плоскостей, в данном случае для совместной обработки удобнее использовать параметры (ориентировки и углы падения) полюсов этих плоскостей (Рис. 4*a*). Рассчитанные средние значения их составляют: $pNP1=14\angle50^\circ$, $pNP2=183\angle40^\circ$. Соответственно, сами плоскости идентифицируются как надвиг и взброс с элементами залегания $194\angle40^\circ$ и $3\angle50^\circ$ (азимут падения и

угол падения) без сколько-нибудь существенной сдвиговой составляющей и с ориентировкой проекций векторов смещений 183∠40° и 14∠50°.



Рис. 4. Стереографическое отображение обстановок субмеридионального сжатия: a – модель сейсмогенеза взбросового типа; δ , δ – соотношение (δ – на стереограмме, δ – на разрезе) параметров полученной модели и структур, образовавшихся в трансформированном поле напряжений: механизма взбросового очага №12 (с индексом 12) и реконструированного положения Березовского надвига в Равнинном Крыму (элементы с индексом БН в пересчете на нижнюю полусферу, по [29]). Условные обозначения (для этой и других квазимоделей, обусловленных разными обстановками – на Рис. 6, 8 и т. д.). 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), бергштрихи со стороны падения плоскости, стрелки – направления перемещения лежачего крыла; 5-7 – проекции главных осей напряжений (5 – максимального сжатияминимального растяжения, 6 – максимального растяжения–минимального сжатия, 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.

Полученные (несмотря на относительную малочисленность выборки) статистические оценки абсолютных отклонений от среднего значения полюса каждой плоскости составляют: среднее абсолютное отклонение – $\Delta_I = 17^\circ$, $\Delta_2 = 19^\circ$;

размах вариации – $R_I=8^\circ$, $R_2=29^\circ$; дисперсия – $s_1^2=13^\circ$, $s_2^2=84^\circ$; стандартное отклонение – $s_I=4^\circ$, $s_2=9^\circ$. Соответственно, коэффициенты вариации равняются: $V_{pNPI}=21\%$ и $V_{pNP2}=48\%$. Это позволяет расценивать результаты построений как статистически вполне обоснованную модель (а не квазимодель), в которой реконструированное поле напряжений характеризуется значениями: $P=08\angle06^\circ$, $N=277\angle08^\circ$ и $T=135\angle82^\circ$; деформационный режим – взбросовый. Сравнение параметров модели с решением механизма очага №35 ($P=14\angle00^\circ$, $N=284\angle19^\circ$, $T=104\angle71^\circ$) показывает их значительное сходство, позволяя рассматривать данное решение в качестве верификационного элемента полученной модели. Кроме того, последняя идентична моделям взбросового сейсмогенеза, отражающим обстановки субмеридионального сжатия в пределах других сегментов Средиземноморского пояса (Загроса, Вранча, Кавказа и прилегающих территорий [23–25]), а также в полной мере согласуется с результатами анализа новейших разрывов и смещений (по зеркалам скольжения) в Горном Крыму [30].

плоскостей механизма Элементы залегания нодальных очага №12 (NP1=166∠80°, NP2=58∠29°) явно «выпадают» из общего распределения. В то же время, проекции осей сжатия и растяжения очага №12 на стереограмме расположены в непосредственной близости от нодальных плоскостей полученной модели и наоборот (Рис. 46). Поскольку обе оси сжатия располагаются строго в противоположных сегментах стереограммы (по азимутам 8° и 188°), а промежуточная ось *N* ориентирована субширотно, вполне допустимо предположить, что в этом очаге система напряжений претерпела трансформацию по отношению к первичному положению регионального поля (горизонтального субмеридионального сжатия), показанному на Рис. 4*a*, вследствие чего направления действия нормальных и максимальных касательных напряжений поменялись местами. Это проиллюстрировано на меридионально ориентированном (по направлению действия осей Р) разрезе (Рис. 4в), где нодальные плоскости очага №12 почти совпадают с направлением осей сжатия и растяжения полученной модели и наоборот, образуя сектора в (10±4)°. При этом угловое расстояние между центрами секторов составляет (45±3)°, а угол разворота системы против часовой стрелки вокруг промежуточной оси оценивается в 35÷40°. В аналогичных условиях был сформирован Березовский надвиг в пределах Равнинного Крыма – надвиговая для структура, которой уверенно устанавливаются пространственнокинематические параметры по данным глубокого бурения [29].

В обстановке субмеридионального сжатия было реализовано и землетрясение 13.05.2016 г., механизм очага которого характеризуется сдвиговым деформационным режимом (№33 в Табл.1 и на Рис. 3), являясь антиподом сдвиговых очагов №№4,11, которые, вероятнее всего, сформировались в условиях субмеридионального растяжения.

Кинематические обстановки *субширотного сжатия*, которые проявлены гораздо слабее, тем не менее, также имели место в пределах исследуемого региона (Рис. 5).



Рис. 5. Распределение очагов землетрясений, обусловленных обстановками субширотного сжатия (показаны черным) и субмеридионального растяжения (показаны серым), и структурно-кинематические характеристики их нодальных плоскостей. Условные обозначения см. на Рис. 3.

Однозначно на это указывают решения механизмов двух очагов землетрясений (№№23 и 27 в Табл. 1) с весьма близкими параметрами, размах вариации между которыми не превышает $8\div13^\circ$ (при абсолютном отклонении от среднего $4\div7^\circ$), что позволило объединить их в одну квазимодель взбросового типа (Рис. 6а). Ее *NP1*=276∠42° *NP2*=64∠54° нодальные плоскости И идентифицируются, соответственно, как правый сдвиго-надвиг – надвиг с некоторой правосдвиговой составляющей, и левый сдвиго-взброс - почти «чистый» взброс с незначительным отклонением направления смещения по левому сдвигу. Реконструированное поле напряжений характеризуется значениями: P=78∠06°, N=346∠15° и T=188∠74°; деформационный режим – взбросовый. Согласно уточненным параметрам механизма очага № 31, последний также образовался в обстановке субширотного сжатия.

Формирование очагов землетрясений сдвигового типа с широтно ориентированной осью P ($N \ge N \ge 4$ и 11 в Табл. 1) равновероятно как в обстановках субширотного сжатия, так и субмеридионального растяжения (Рис. 66). В первом случае оси P и T характеризуют направления действия, соответственно, максимального и минимального сжимающих напряжений, во втором (наиболее вероятном) – минимального и максимального растяжения (Рис. 5). Предполагаемые разрывы в очагах представлены сдвигами ($N \ge 11$) и сдвигами с незначительной сбросовой составляющей ($N \ge 4$). При этом нодальные плоскости NP2 имеют весьма

близкие элементы залегания ($221\angle 69^{\circ}$ и $210\angle 82^{\circ}$), размах вариации полюсов которых не превышает 16°, а абсолютное отклонение – 8°. Расхождения в остальных параметрах более существенны и достигают 32° (с отклонением от среднего до 16°), что незначительно выходит за пределы 15° доверительного интервала, используемого при тектонофизических реконструкциях [27].



Рис. 6. Квазимодели, аппроксимирующие кинематические обстановки субширотного сжатия (a – взбросовый деформационный режим) или субширотного сжатия – субмеридионального растяжения (δ – сдвиговый деформационный режим). Условные обозначения см. на Рис. 4.

Построенная путем усреднения значений соответствующих параметров квазимодель (Рис. 66) отражает общий характер обстановок формирования обоих очагов, который можно аппроксимировать тензором напряжений с $P=82\angle 16^\circ$, $N=235\angle 72^\circ$ и $T=352\angle 07^\circ$ (деформационный режим – сдвиговый) и нодальными плоскостями $NP1=308\angle 84^\circ$, $NP2=218\angle 72^\circ$, первая из которых представляет собой правый сдвиг с весьма незначительной сбросовой составляющей, вторая – левый сдвиг.

Кинематические обстановки регионального юго-восточного-северо-западного сжатия реконструированы в очагах землетрясений, образующих две относительно компактные группы, одна из которых локализована в пределах Южнобережной сейсмогенной зоны и ее юго-западного продолжения, вторая - в Керченско-Анапском районе (Рис. 7). B этих обстановках формировались очаги, характеризующиеся взбросовым И взбросо-сдвиговым деформационными режимами, каждый из которых представлен четырьмя событиями. Особенности сейсмогенеза в данной кинематической обстановке, учитывая проявления результаты построений, можно обосновать, сопоставляя по предыдущих отдельности параметры групп очагов с разным деформационным режимом.

Сравнение очагов взбросового типа показало, что особенности их проявления аналогичны таковым для сейсмогенеза, обусловленного обстановками субмеридионального сжатия: полученные решения позволяют обосновать две

квазимодели, которые можно рассматривать как следствие влияния первичного и трансформированного полей напряжений, когда проекции осей сжатия и растяжения одной из них на стереограмме тяготеют к проекциям нодальных плоскостей второй и наоборот.



Рис. 7. Распределение очагов землетрясений взбросового (*a*) и взбросо-сдвигового (*б*) типов, обусловленных обстановками юго-восточного-северо-западного сжатия, и структурно-кинематические характеристики их нодальных плоскостей. Условные обозначения см. на Рис. 3.

В первой квазимодели (Рис. 8*a*), построенной путем осреднения значений параметров сходных механизмов очагов ($N \ge N \ge 2$ и 7 в Табл. 1), ориентировки осей напряжений составляют: $P=315\angle 17^\circ$, $N=216\angle 20^\circ$ и $T=80\angle 64^\circ$; деформационный режим – взбросовый.

Нодальные плоскости, одна из которых представляет собой надвиг с существенной правосдвиговой составляющей, вторая – левый сдвиго-взброс (взброс незначительной сдвиговой компонентой), имеют элементы с залегания *NP1*=156∠34° и *NP2*=298∠64°. При этом размах вариации значений одноименных параметров равен 15÷31° при абсолютном отклонении 8÷16°; последнее, как и в случае сдвигового типа, лишь незначительно выходит за пределы пятнадцатиградусного доверительного интервала.

Вторая из квазимоделей (Рис. 86), аппроксимирующая решения также механизмов двух очагов (в Табл. 1 – №9 и №34), характеризуется меньшим размахом вариации значений одноименных параметров ($15\div20^{\circ}$) при абсолютном отклонении $7\div10^{\circ}$. Ориентировки осей напряжений в ней составляют: $P=150\angle19^{\circ}$, $N=60\angle2^{\circ}$ и $T=323\angle73^{\circ}$, отражая взбросовый тип деформационного режима. Первая нодальная плоскость идентифицируется как надвиг с падением на северо-запад

(*NP1*=333∠27°), вторая – как взброс юго-восточного падения (*NP2*=149∠63°); смещение по обеим происходило без какой-либо сдвиговой составляющей.



Рис. 8. Квазимодели взбросового (*a*, *б*) и взбросо-сдвигового (*г*) типов, аппроксимирующие кинематические обстановки юго-восточного-северо-западного сжатия; *в* – соотношение на разрезе проекций нодальных плоскостей и главных осей напряжений для первой (черное, с индексом 1) и второй (серое, с индексом 2) квазимоделей взбросового типа; на Рис. *г* также приведено решение механизма очага землетрясения 05.07.1984 г. взбросо-сдвигового типа (серое, с индексом 32, согласно номеру в Табл. 1). *Условные обозначения см. на Рис. 4*.

Аппроксимация одной квазимоделью 3-х решений механизмов очагов взбрососдвигового типа, сформировавшихся в обстановках юго-восточного-северозападного сжатия (N_2N_2 3, 21 и 24 в Табл. 1), также вполне допустима, хотя разброс значений параметров при этом будет несколько значительнее: абсолютное их отклонение от среднегеометрического составит от 5 до 24° (Рис. 8*г*). Это изначально может быть предопределено самой природой взбросо-сдвиговых деформационных режимов, которые, в отличие от основных (первичных) – сдвигового, взбросового и сбросового – уже претерпели некоторую трансформацию, обусловленную локальными особенностями вмещающей среды или релаксацией напряжений в зонах динамического влияния сейсмогенных разрывов высокого ранга. Тензор напряжений полученной квазимодели взбросо-сдвигового типа характеризуется следующими ориентировками основных осей: $P=305 \le 10^\circ$, $N=46 \le 47^\circ$, $T=208 \le 46^\circ$. Ее нодальные плоскости с элементами залегания $NP1=338 \le 68^\circ$ и $NP2=86 \le 52^\circ$ в

структурно-кинематическом отношении представляют собой, соответственно, правый и левый взбросо-сдвиги.

Весьма интересным представляется соотношение полученной квазимодели с относительно недавно опубликованными данными по решению механизма очага землетрясения 05.07.1984 г. [20] также взбросо-сдвигового типа (№32 в Табл. 1). Это соотношение отражает симметричный характер трансформаций тензора напряжений относительно положения оси сжатия P путем его разворота приблизительно на 90° таким образом, что проекции остальных осей (T и N) меняются местами (Рис. 8*г*). Аналогичная ситуация имеет место также в Кавказском регионе [25] и в пределах системы Загрос [23]. Представляется, что подобный эффект может возникать в условиях всестороннего стресса, когда ось T характеризует не растяжение, а направление минимального (дополнительного) сжатия.

Кинематическая обстановка *юго-западного-северо-восточного сжатия* представлена всего 3-мя решениями механизмов очагов, один из которых ($\mathbb{N} \ge 10$ в Табл. 1) характеризуется взбросовым деформационным режимом, а два ($\mathbb{N} \ge \mathbb{N} \ge 19$ и 30) — взбросо-сдвиговым. Наличие данного типа сейсмогенеза в пределах Туапсинской впадины и в зоне сочленения последней с южным бортом Индоло-Кубанского прогиба ($\mathbb{N} \ge \mathbb{N} \ge 10$ и 30, Рис. 9) представляется закономерным, учитывая геодинамические особенности Кавказского региона и его обрамления, которые в трансформированном виде проявились и на юге Крымского полуострова ($\mathbb{N} \ge 19$).



Рис. 9. Распределение очагов землетрясений взбросового и взбросо-сдвигового типов, обусловленных обстановками юго-западного-северо-восточного сжатия, и структурно-кинематические характеристики их нодальных плоскостей. Условные обозначения см. на Рис. 3.

Результаты аппроксимации всех 3-х решений механизмов очагов можно лишь условно назвать квазимоделью, учитывая, во-первых, использование данных, отнесенных к разным деформационным режимам, и, во-вторых, весьма существенный размах вариации значений одноименных параметров, достигающий 45° , при абсолютном отклонении от среднего до 27° . С другой стороны, весьма узкий сектор локализации осей сжатия *P* во всех 3-х очагах, составляющий всего

10° (Рис. 10*a*), свидетельствует об относительно устойчивом направлении регионального сжатия в данной обстановке. Полученные, за неимением других данных, результаты усреднения параметров всех трех решений очагов характеризуют обстановку следующими ориентировками основных осей: $P=236\angle10^\circ$, $N=140\angle38^\circ$, $T=341\angle47^\circ$, деформационный режим – взбросо-сдвиговый. Соответственно, нодальные плоскости с элементами залегания $NP1=95\angle49^\circ$ и $NP2=207\angle68^\circ$ в структурно-кинематическом отношении представляют собой правый и левый взбросо-сдвиги.



Рис. 10. Результаты аппроксимации кинематической обстановки юго-западногосеверо-восточного сжатия: **a** – квазимодель взбросо-сдвигового типа; **б** – соотношение в разрезе проекций нодальных плоскостей и главных осей напряжений в решениях механизмов очагов (индексы соответствуют номерам землетрясений в Табл. 1). Условные обозначения см. на Рис. 4.

Учитывая, что оси сжатия в очагах, сформированных в данной кинематической обстановке, ориентированы в противоположных (юго-западном – P_{10} , P_{30} (Подстрочные индексы указанных параметров соответствуют номерам событий в Табл. 1.) и северо-восточном $- P_{19}$) направлениях, данную систему можно также проанализировать и через призму трансформации полей напряжений – по аналогии с обстановками субмеридионального и юго-восточного-северо-западного сжатия (Рис. 46, 86). В этом случае полученная квазимодель распадается на две составляющие, представленные очагами №№ 10, 30 и №19. На ориентированном с юго-запада на северо-восток (по направлению действия осей P) разрезе образуемые анализируемыми решениями механизмов «триады» (проекции одной из осей напряжений и 2-х нодальных плоскостей или одной нодальной плоскости и 2-х осей напряжений) имеют секторальное распределение (Рис. 106). В правой (северовосточной) части разреза они сгруппированы в пределах весьма узких (6÷8°) секторов, в юго-западной части разброс параметров триад довольно значителен (14÷20°). Соответственно, и величины углов между биссектрисами этих секторов характеризуются большим разбросом $(45\pm13)^\circ$, чем на разрезе, приведенном на Рис.

86. Тем не менее, и в данном случае просматривается секторальное распределение в углах наклонов проекций рассматриваемых параметров, объясняемое трансформацией (разворотом относительно оси *N*) тензоров напряжений, когда плоскость действия касательных напряжений в очагах №№10 и 30 становится плоскостью размещения осей нормальных напряжений, реконструированных в очаге № 19, и/или наоборот. Учитывая обособленное положение последнего, можно полагать, что условия его формирования отражают более высокий уровень трансформации поля напряжений, поскольку он находится на периферии основной области проявления обстановок юго-западного–северо-восточного сжатия.

3. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК РАСТЯЖЕНИЯ

Кинематические обстановки растяжения в пределах исследуемого региона идентифицированы в 9-ти очагах землетрясений, рассредоточенных практически на всем его протяжении. Параметры решений механизмов четырех из них указывают на то, что эти очаги формировались в условиях сбросовых деформационных режимов. Остальные характеризуются взбросо-сбросовым режимом, причем, все они отражают обстановки растяжения, поскольку углы наклона оси T укладываются в интервал $30\div45^\circ$, а нодальные плоскости в структурно-кинематическом отношении являются сбросами, сдвиго-сбросами или сбросо-сдвигами (Табл. 1).

Обстановки субмеридионального растяжения представлены двумя близко расположенными очагами сбросового типа из Анапской группы (№№22 и 25 в Табл. 1, Рис. 5). Размах вариации значений их основных параметров довольно значителен: для оси T, являющейся основной при определении данного типа кинематической обстановки, он наименьший и составляет 26° (абсолютное отклонение 13°). Квазимодель, полученная путем осреднения (Рис. 11*a*), представляет собой образец «идеального» (по [27]) деформационного режима сбросового типа: ориентировки основных осей составляют $P=264\angle80^\circ$, $N=79\angle09^\circ$, $T=170\angle01^\circ$, а нодальные плоскости ($NPI=159\angle47^\circ$ и $NP2=358\angle44^\circ$) представляены сбросами субширотного простирания, падающими в южном и северном направлениях.

По-видимому, в обстановках субмеридионального растяжения происходило и формирование описанных выше очагов землетрясений сдвигового типа с широтно ориентированной осью P (№№4 и 11 в Табл. 1; Рис. 66). Их реализация равновероятно могла осуществиться как при субмеридиональном растяжении, так и при субширотном сжатии, однако, учитывая инверсионный характер изменения кинематических обстановок в регионе [31], первое условие представляется более вероятным.

ОБСТАНОВКИ СЕЙСМОГЕНЕЗА КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА



Рис. 11. Результаты аппроксимации кинематических обстановок субмеридионального растяжения (а); механизмы очагов сбросового (черное, с индексом 1) и взбросо-сбросового (серое, с индексами 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 Рис. 4.

В обстановке *юго-восточного-северо-западного растяжения* было реализовано самое сильное (за последние 100 лет) землетрясение в регионе 11.09.1927 г. с Mw =6.9 (№1 в Табл. 1), вызвавшее многочисленные разрушения в пределах Южного берега Крыма [16]. Поскольку данное событие по энергетическому уровню близко к максимально возможным для региона с M=7.0±0.2 [3], то (с некоторой долей условности) можно считать параметры решения механизма его очага (NPI=111∠69°, NP2=334∠28° – правый и левый сдвиго-сбросы, соответственно, и P=263∠62°, N=28∠17°, T=125∠22°) максимально приближенными к «эталонным» для землетрясений со сбросовым деформационным режимом, сформировавшихся в данной обстановке (на Рис. 116 показано черным с индексом 1).

Две компактные группы очагов с идентичными параметрами среднего механизма ($N \ge N \ge 6$ и 8 в Табл. 1) характеризуются взбросо-сбросовым режимом. На условия растяжения их возникновения указывают величины углов наклона оси *T* (34°) и структурно-кинематическая идентификация их нодальных плоскостей в качестве сброса и правого сдвиго-сброса (на Рис. 116 – серое, с индексом 6,8).

Соотношение проекций нодальных плоскостей и главных осей напряжений в очагах со сбросовым (первичным) и взбросо-сбросовыми деформационными режимами таково, что оси P и T очага №1 расположены вблизи проекций нодальных плоскостей в решениях механизмов №№6 и 8, и наоборот. При этом направление промежуточной оси N в обоих случаях практически одинаково, отличаясь всего на 5÷6° (Рис. 116). На разрезе (ориентированном с северо-запада на юго-восток, перпендикулярно оси N) разница между углами падения попарно расположенных проекций осей напряжений и нодальных плоскостей составляет $(12\pm3)^\circ$, а угол между серединами образуемых ими секторов – $(45\pm4)^\circ$ (Рис. 116). Вышесказанное

позволяет допустить возможность трансформации сбросового поля во взбрососбросовое путем поворота на эту величину тензора напряжений вокруг промежуточной оси.

Все вышеперечисленные очаги (№№1, 6 и 8) образуют компактную группу в пределах Южнобережной сейсмогенной зоны, протягивающейся в северовосточном направлении вдоль континентального склона – морфологически и тектонически выраженной границы между материковой частью и впадиной Черного моря (Рис. 12, врезка).





Кинематические обстановки *юго-западного-северо-восточного растяэжения* (Рис. 12) обусловили возникновение очагов, характеризующихся относительно широким спектром решений их механизмов и разными деформационными режимами – взбросо-сбросовым ($\mathbb{N} \otimes \mathbb{N} \otimes 5$, 16 и 18 в Табл. 1 с углами наклона оси *T* в интервале $30 \div 45^{\circ}$) и сбросовым ($\mathbb{N} \otimes 15$ – там же).

Учитывая установленный секторальный характер распределения ориентировок структурообразующих осей напряжений в процессах сейсмогенеза и новейшего тектонического разрывообразования, последний очаг (№15) почти отвечает условиям «идеального» деформационного режима сбросового типа ($P=81\angle67^\circ$, $N=317\angle14^\circ$, $T=223\angle18^\circ$) со строго диагональным ($223^\circ \leftrightarrow 43^\circ$) направлением растяжения (Рис. 13*a*). Нодальные плоскости с элементами залегания $NP1=234\angle65^\circ$

и NP2=22∠29° представляют собой сброс и правый сдвиго-сброс северо-западного простирания.



Рис. 13. Кинематические обстановки *юго-западного-северо-восточного* растяжения: **а** – решение механизма очага первичного (сбросового) типа (\mathbb{N}_{15}); **б-в** – инверсионное соотношение проявлений взбросо-сбросового типа (квазимодели \mathbb{N}_{25} и 18, показана черным, и очага \mathbb{N}_{16} , серый с индексом 16) на стереограмме (**б**) и в разрезе (**в**); **г** – соотношение первичного и трансформированного полей напряжений на примере очагов \mathbb{N}_{15} (показан черным с индексом 15) и \mathbb{N}_{16} (серый с индексом 16). Условные обозначения см. на Рис. 4.

Два очага (№№5, 18 в Табл. 1) из трех, представленных взбросо-сбросовым деформационным режимом, имеют сравнительно близкие значения соответствующих параметров (размах вариации составляет $7\div18^{\circ}$), что позволяет аппроксимировать их квазимоделью (Рис. 13 δ , показана черным) с ориентировками осей напряжений $P=42\angle49^{\circ}$, $N=300\angle10^{\circ}$, $T=202\angle39^{\circ}$ и с нодальными плоскостями $NP1=211\angle84^{\circ}$ и $NP2=330\angle10^{\circ}$, одна из которых представляет собой крутой сброс, вторая – весьма пологий правый сбросо-сдвиг.

Разнообразие и особенности соотношения элементов решений механизмов очагов, обусловленных юго-западной-северо-восточной ориентировкой растягивающих напряжений, позволяют рассмотреть некоторые из них в качестве индикаторов инверсии кинематической обстановки (когда оси *P* и *T* меняются

местами) или трансформации поля напряжений (когда меняются местами плоскости максимальных касательных и нормальных напряжений).

Инверсионный характер проявления сейсмогенерирующего поля иллюстрирует соотношение параметров квазимодели (очаги №№5 и 18) и очага №16 взбрососбросового типа, в которых одна из нодальных плоскостей представлена крутым (до 80 и более градусов) сбросом, вторая – пологим (менее 10°) сбросо-сдвигом или сдвиго-сбросом. При этом главные оси напряжений P и T для этих очагов на стереограмме и в разрезе (Рис. 13*б*, *в*) проецируются в противоположных направлениях таким образом, что положение оси максимального растяжения T квазимодели почти совпадает с положением оси минимального растяжения P очага №16 и наоборот: сектора на разрезе, образуемые противоположными осями и нодальными плоскостями составляют $12\div16^\circ$, а угловые расстояния между биссектрисами этих секторов – $(45\pm1)^\circ$, что может быть обусловлено изменением тензора напряжений относительно оси N на $(90\pm6)^\circ$.

Вполне допустимо предположить, что в данной обстановке проявилась и трансформация регионального поля напряжений, заключающаяся в замене первичного – сбросового – деформационного режима взбросо-сбросовым. На это указывает соотношение основных параметров в очагах соответствующих типов. На втором разрезе, ориентированном в юго-западном-северо-восточном направлении (Рис. 13г), видно, что проекции осей напряжений и нодальных плоскостей в решениях механизмов №15 (сбросового) и №16 (взбросо-сбросового) образуют узкие (8±2)° сектора, середины которых удалены друг от друга на (45±1)°. Как отмечалось выше, подобная взаимосвязь может быть обусловлена тем, что плоскости максимальных касательных и нормальных напряжений меняются местами.

4. ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗУЧЕНИЯ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ РЕГИОНАЛЬНОГО СЕЙСМОГЕНЕЗА

Как видно из вышеизложенного, разнообразие деформационных режимов и кинематических обстановок сейсмогенного разрывообразования в пределах Крымско-Черноморского региона указывает на весьма сложный и изменчивый (как во времени, так и в пространстве) характер условий сейсмогенеза, о чем свидетельствуют параметры тензоров напряжений полученных квазимоделей (Табл. 2). В то же время, структурно-кинематический анализ этих квазимоделей показал, что региональные особенности проявления сейсмогенерирующих полей напряжений вполне согласуются с таковыми, выявленными в пределах других сегментов Средиземноморского пояса – в системе Загрос, в области Вранча и на территории Кавказа и прилегающих к нему районов [23–25].

В первую очередь это выражается в *секторальном распределении ориентировок* «активных» осей *P* и *T* (обусловливающих соответствующие кинематические обстановки) как в обобщающих построениях, так и в решениях отдельных механизмов очагов, не включенных в состав квазимоделей.

Таблица 2.

Направление	Ориенти	ровка осей на	Тип режима и поля								
регионального сжатия	(a3	имут/угол), г	напряжений								
или растяжения	Р	N	Т	(п – первичное,							
				т – трансформированное)							
Обстановки регионального сжатия											
субмеридиональное	08/06	277/08	135/82	взбросовый (п)							
	188/30	81/26	318/48	взбросовый (т)							
	200/10	315/67	106/20	сдвиговый (п)							
субширотное	78/06	346/15	188/74	взбросовый (п)							
ЮВ-СЗ	150/19	60/02	323/73	взбросовый (п)							
	315/17	216/20	80/64	взбросовый (т)							
	305/10	46/47	208/46	взбросо-сдвиговый (т)							
ЮЗ-СВ	236/10	140/38	341/47	взбросо-сдвиговый (т)							
Обстановки регионального растяжения											
субмеридиональное	264/80	79/09	170/01	сбросовый (п)							
	82/16	235/72	352/07	сдвиговый (п)							
ЮВ-СЗ	263/62	28/17	125/22	сбросовый (п)							
	134/54	29/11	292/34	взбросо-сбросовый (т)							
ЮЗ-СВ	81/67	317/14	223/18	сбросовый (п)							
	42/49	300/10	202/39	взбросо-сбросовый (т)							

Параметры тензоров напряжений в квазимоделях сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона.

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

Проекции осей Р локализованы в секторах ортогональных и диагональных направлений (Рис. 14а). Три из них – субмеридиональный, северо-западный-юговосточный и субширотный – с расхождением в несколько первых градусов приближены к положению секторов, показанных на Рис. 2. Несколько развернутое (на 10÷15° по часовой стрелке) направление юго-западного-северо-восточного сжатия в регионе по отношению к границам соответствующего сектора на Рис. 2 можно объяснить, во-первых, недостаточным количеством идентифицированных землетрясений данного типа сейсмогенеза и допусками, неизбежными при решении механизмов очагов, во-вторых, взбросо-сдвиговым типом деформационного режима этих проявлений, который допускает вероятность некоторой трансформации поля напряжений либо наличие транспрессии, предполагающей активизацию косого сдвига и, соответственно, отклонение оси сжатия от положения, равноудаленного от нодальных плоскостей. По этим же причинам несколько «размыто» (до 30°) направление юго-восточного-северо-западного сжатия, хотя оси Р соответствующих взбросовых квазимоделей, характеризующих первичное поле напряжений, образуют сектор с углом, равным 17°.

На круговой диаграмме ориентировок осей T в проявлениях обстановок регионального растяжения видно, что и это распределение носит секторальный характер, при этом углы секторов, образуемых осями T, составляют $8 \div 18^{\circ}$ (Рис.

146). Аналогичные данные по обстановкам растяжения в других вышеназванных регионах отсутствуют или не обрабатывались. Тем не менее, полученные результаты согласуются как с закономерностями ориентировок осей сжатия в проявлениях сейсмогенеза, так и с секторальным распределением главных осей напряжений (в том числе – осей растяжения), установленным при анализе структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений, характеризующих процессы новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма [30].



14. Характер распределения ориентировок Рис. главных осей структурообразующих полей напряжений: a – осей P в квазимоделях сейсмогенеза и в решениях отдельных механизмов очагов, отражающих обстановки регионального сжатия; $\boldsymbol{\delta}$ – осей *T* в квазимоделях сейсмогенеза и в решениях отдельных механизмов очагов, сформировавшихся в обстановках растяжения. Условные обозначения: 1-3 - проекции осей Р в квазимоделях взбросового (1), взбрососдвигового (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 (номера указаны цифрами); затенены сектора и пояса локализации осей Р и Т на стереограмме.

Стереограмма (Рис. 14*б*) показательна еще и в том отношении, что на ней просматривается «поясной» характер распределения проекций осей растяжения. При этом к поясу 35÷50° приурочены проекции осей *T* в проявлениях сейсмогенеза (квазимоделях и отдельных очагах), возникновение которых происходило преимущественно в условиях трансформированных систем напряжений.

В этой связи следует еще раз отметить, что в ходе описания результатов сравнительного анализа разных типов сейсмогенеза приходится оперировать такими категориями, как «первичные» и «вторичные» поля напряжений, подразумевая, что к первой из этих категорий отнесены те из них, которые обусловили проявления сдвигового, взбросового и сбросового деформационных режимов. Комбинаторные их проявления в виде взбросо-сбросового, взбросо-сдвигового и т.п.

деформационных режимов рассматриваются как следствия тех или иных трансформаций первичного поля. Косвенным подтверждением этого является различие энергетических уровней землетрясений, сформировавшихся в идентичных кинематических условиях, но характеризующихся разными деформационными режимами (Рис.15).



Рис. 15. Предельные значения магнитуд землетрясений Крымско-Черноморского региона, сформировавшихся в условиях основных (верхняя, темная кривая) и трансформированных (нижняя, светлая кривая) деформационных режимов для разных кинематических обстановок: регионального сжатия (залитые стрелки) и растяжения (не залитые стрелки).

Из приведенного на Рис. 15 графика видно, что:

- предельные значения магнитуд землетрясений сдвигового, взбросового и сбросового типов существенно выше, чем для остальных типов сейсмогенеза, реализовавшихся в аналогичных кинематических условиях;

- в некоторых обстановках (субширотного сжатия, субширотного сжатиясубмеридионального растяжения и субмеридионального растяжения), характеризующихся сравнительно невысоким уровнем предельных значений магнитуд, очаги с деформационными режимами, не относящимися к категории первичных, в регионе не идентифицированы;

- относительно небольшая разница на графиках предельных значений магнитуд для землетрясений, реализовавшихся в обстановках субмеридионального сжатия, компенсируется преобладающим количеством механизмов взбросового типа (восемь) при только одном очаге (N12 с Mw=4.3), возникшем в трансформированном поле напряжений (Рис. 4); в энергетическом отношении (по

уровню выделившейся сейсмической энергии) этот фактор делает разницу между проявлениями первичного и вторичного поля весьма и весьма существенной.

Следующее значимое положение отражает системный характер проявления сейсмогенерирующих инверсий u трансформаций полей в регионе. Сопоставительный анализ результатов стереографических 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 квазимоделями) и инверсий кинематических обстановок (в случаях, когда оси регионального сжатия и растяжения меняются местами). Под инверсией в данном случае понимается не одномоментное изменение характера обстановки на противоположное (поскольку применяемые методы и используемые данные не позволяют восстановить строгую хронологическую последовательность этих превращений даже при использовании сейсмологических данных, представленных только сильными землетрясениями), а констатация факта взаимозаменяемости положения осей сжатия и растяжения в соответствующих обстановках.

В этом плане особый интерес представляет соотношение ориентировок структурообразующих осей Р и Т и положение нодальных плоскостей в проявлениях сейсмогенеза, обусловленных влиянием сжимающих и растягивающих напряжений, действующих в одном направлении и отражающих, таким образом, наличие инверсии кинематических обстановок в регионе. Это соотношение результатами совмещения наглядно иллюстрируется на стереограммах квазимоделей или механизмов очагов, сформированных в противоположных обстановках, и построением сводных разрезов, ориентированных вдоль направления действия «активных» осей *P* и *T*, приблизительно перпендикулярно к оси *N* (Рис. этого на плоскости разрезов со стереограмм, отражающих 16). Для противоположные обстановки сейсмогенеза (сжатия и растяжения, действующих в одном направлении), вынесены проекции нодальных плоскостей и осей напряжений, сходящиеся в точке N (положение проекции промежуточной оси), с последующим анализом соотношений их пространственных параметров.

Общие особенности проявления инверсионных обстановок субмеридионального сжатия и растяжения можно охарактеризовать следующим образом:

1. На стереограмме, где совмещены соответствующие квазимодели взбросового и сбросового типов (Рис. 16*a*), проекции осей *P* и *T* находятся на разных полюсах, отклоняясь от меридионального направления на $8\div10^\circ$, а падающие в северном направлении нодальные плоскости (идентифицируемые, соответственно, как взброс и сброс) практически совпадают; т.е. данные модели представляют собой практически полные антиподы.

2. Учитывая незначительный наклон «активных» осей P (6°) и T (1°), локализованных в противоположных секторах стереограммы и разреза, направления действия субмеридиональных сжимающих и растягивающих напряжений в регионе можно считать горизонтальными (Рис. 16*a*, \boldsymbol{o}). В процессе инверсии

кинематических обстановок оси *P* и *T* меняются местами, при этом разница в углах наклона взаимозаменяющихся осей в плоскости разреза составляет менее 10°.



Рис. 16. Соотношение (на стереограммах и сводных разрезах) проекций основных осей (P, T) и нодальных плоскостей в проявлениях разных типов сейсмогенеза, отражающих наличие инверсии кинематических обстановок сжатия (показаны черным) и растяжения (показаны серым) в направлениях: a-e – субмеридиональном; z-e – юго-восточном–северо-западном; m-s – юго-западном–северо-восточном; u – номограмма изменения наклонов проекций для плоскостей с разными углами падения (δ) при различных их отклонениях (β) от положения, перпендикулярного к линии разреза. Пояснения – в тексте; условные обозначения см. на Рис. 4.

3. Проекции нодальных плоскостей, в структурно-кинематическом отношении являющихся антиподами (взброс и надвиг, сформировавшиеся в обстановке сжатия, и сбросы, обусловленные условиями растяжения) также практически совпадают в плоскости разреза: максимальная разница в углах наклона проекций плоскостей, падающих в одном направлении, составляет 4÷5° (Рис. 16*б*).

Следует отметить, что на разрезах, как представленных на Рис. 16, так и приведенных выше (Рис. 46; 86; 106 и др.), положение нодальных плоскостей зачастую не является перпендикулярным к плоскости разреза. Вследствие этого, углы наклона их проекций на разрезах также несколько отличаются от истинного наклона плоскостей в меньшую сторону. Это отличие будет тем значительнее, чем больше отклонение нодальной плоскости от положения, перпендикулярного разрезу. Оценить влияние этого фактора на корректность выполненных построений позволяет номограмма (Рис. 16и), на которой показано изменение наклонов проекций для плоскостей с разными углами падения (δ) при различных их отклонениях (β) от положения, перпендикулярного к линии разреза. Из номограммы видно, что даже достаточно строгие ограничения, накладываемые на параметр δ (5% и 10%), допускают возможность изменения β на весьма значительную величину – 25÷46° и 32÷57° соответственно. Поскольку отклонения анализируемых нодальных плоскостей от линий разрезов, как правило, укладываются в эти диапазоны, расхождение между истинными углами наклонов нодальных плоскостей и углами падения их проекций в приведенных построениях (разрезах) не превышает 5, в редких случаях - 10%.

4. Угловая разница между центрами всех секторов разреза, образуемых совокупностями проекций осей и нодальных плоскостей, равняется 44÷46°, т.е. отклонение от идеального распределения является минимальным – (45±1)°.

5. К этим же секторам тяготеют и проекции осей и нодальных плоскостей взбросового очага $N \ge 12$, сформировавшегося в трансформированном поле напряжений (на Рис. $16\boldsymbol{o}$ – с индексом «12»). При этом оси напряжений в его решении расположены вблизи нодальных плоскостей квазимоделей, аппроксимирующих обстановки меридионального сжатия-растяжения и наоборот: их отклонения от центров секторов не превышают $10\div 12^\circ$.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что сейсмогенное разрывообразование в регионе как взбросового, так и сбросового типов, обусловленное обстановками соответственно субмеридионального сжатия и растяжения, характеризуется в основном деформационными режимами, которые относятся к категории первичных (нетрансформированных). В эту систему вполне вписываются и результаты трансформации первичного взбросового поля (очаг №12), когда направления нормальных и касательных напряжений меняются местами, обусловливая разворот тензора напряжений вокруг оси N приблизительно на 45°.

Особо следует рассмотреть обстановки *ортогонального сжатия-растяжения*, нашедшие отражение в решениях механизмов очагов *сдвигового* типа (Рис. 16*в*). Они представлены квазимоделью, формирование очагов которой (№№4, 11 в Табл. 1) теоретически равновероятно как в обстановках субширотного сжатия, так и

субмеридионального растяжения (Рис. 66), а также ее антиподом – механизмом очага одного из последних идентифицированных землетрясений (13.05.2016 г., №33 Табл. 1), где определяющими могли быть (так же равновероятно) в условия. противоположные Ha принципиальную возможность наличия структурообразующих полей субширотного сжатия (несмотря на то, что общий тренд современной геодинамики региона обусловлен доминированием тензоров напряжений с меридионально ориентированной осью Р) однозначно указывают очаги взбросового типа, аппроксимируемые квазимоделью (на Рис. 6а). Следовательно, и при анализе сдвиговых типов сейсмогенеза исключение априори варианта широтного сжатия без какого-либо обоснования будет некорректным. Таким образом, для идентификации обстановок формирования сдвиговых антиподов необходимо наличие некоего критерия, позволяющего установить, какая из осей напряжений в данных системах является «активной». Поскольку оси Р и Т в обоих случаях расположены субгоризонтально, но при этом углы их падения все же отличаются приблизительно в два раза, это фактор, за неимением иных, можно выбрать в качестве такого критерия (хотя и косвенного), полагая, что «активной» осью напряжений является та, залегание которой ближе к горизонтальному положению. В итоге получается, что одна из сдвиговых систем обусловлена обстановками субмеридионального сжатия (на Рис. 16в показана черным), вторая же формировалась в условиях субмеридионального растяжения (там же, показана серым). Этот вывод согласуется как с общей тенденцией развития региона, характеризуемой цикличным характером изменения обстановок меридионального сжатия-растяжения [31], так и с некоторыми особенностями в распределении «активных» осей в проявлениях сейсмогенеза, обусловленного влиянием первичных систем напряжений, о чем будет сказано ниже.

Вычленение событий, отражающих инверсионные изменения условий сжатия и растяжения в юго-восточном-северо-западном направлении (Рис. 16, г-е), несколько усложняет то обстоятельство, что каждая из указанных обстановок представлена 2мя квазимоделями (Рис. $8a, \delta$; Рис. 11 δ). При этом в обстановках сжатия «активные» оси Р отклоняются от горизонтального положения в противоположных направлениях (Рис. 8a, δ) примерно на одинаковую величину (17÷19°), что затрудняет определение, которая из квазимоделей обусловлена воздействием формировалась первичного поля напряжений, а какая в условиях трансформированного поля. В обстановках растяжения (Рис. 116) эта задача облегчается тем, что очаги, аппроксимируемые второй квазимоделью, относятся к трансформированным (взбросо-сбросовым). Поэтому в качестве эталона данного типа сейсмогенеза принято решение очага землетрясения №1 с *M*w =6.9 (самого сильного за последние 100 лет), отражающее воздействие первичного сбросового поля (показано серым на Рис. 162).

В процессе сопоставительного анализа выполнено вынесение на отдельные стереограммы попарно квазимоделей сжатия и растяжения, характеризующихся относительно близким положением проекций противоположных «активных» осей и максимальным сходством положений нодальных плоскостей (Рис. 16г, *д*). Кроме этого на разрез, который отражает соотношение параметров обеих квазимоделей

взбросового типа (из Рис. 8*в*), вынесены аналогичные элементы, полученные для решения механизма очага №1 сбросового типа, что приведено на Рис. 16*е*.

Результаты выполненных построений можно интерпретировать следующим образом:

1. Относительная близость значений параметров квазимоделей сжатия и растяжения допускает возможность попарно рассматривать их в сочетаниях:

- квазимодель сжатия взбросового типа, аппроксимирующая решения очагов №№9, 34 из Табл. 1 (Рис. 8*б*), и сбросовый очаг №1, характеризующий условия растяжения; результат их совмещения показан на Рис. 16*г*;

- квазимодели взбросового (для очагов №№2, 7 – Рис. 8*a*) и сбросового (на Рис. 116 с индексами 6,8) типов, соответственно, сжатия и растяжения; результат этого совмещения приведен на Рис. 16 *д*.

В первом случае (Рис. 16г) отмечается полное совпадение положений нодальных плоскостей, имеющих северо-западное падение и идентифицируемых как надвиг и сброс, а также относительная близость в расположении проекций противоположных «активных» осей напряжений (Р и Т). При этом направления сжатия (330° → \leftarrow 150°) и растяжения (304° \leftrightarrow 124°) разнятся довольно значительно (на 26°). На наличие инверсии указывает угловое расстояние между парами противоположных осей, которое составляет (88±4)°. Во второй паре квазимоделейантиподов (Рис. 16д) анализируемые элементы расположены более компактно. Как и в первом случае, падающие на северо-запад нодальные плоскости (взброс и сброс) имеют близкие пространственные параметры (азимуты и углы падения). Полученные направления сжатия (314°→←134°) и растяжения (292°↔112°) отличаются на 22°, но угловое расстояние между одноименными парными осями имеет более существенный разброс, чем на Рис. 16г, и составляет (95±15)°. Простое арифметическое осреднение всех направлений сжатия И растяжения рассматриваемых квазимоделей характеризуется величиной 310° (130°) при разбросе ±20°. Данная ориентировка почти в точности соответствует одной из диагональных систем напряжений, однако при этом приведенные отклонения несколько превышают величину допустимой погрешности.

2. Выше было показано, что в плоскости разреза, ориентированного с северозапада на юго-восток ($310^{\circ} \rightarrow 130^{\circ}$), квазимодели сжатия соотносятся между собой таким образом, что парные комбинации осей напряжений одной из них и нодальных плоскостей – другой, образуют относительно узкие сектора, угловая ширина которых варьирует от 8 до 14° (Рис. 8*в*). Данное соотношение указывает на наличие трансформации (разворота относительно оси *N*) тензоров напряжений, когда плоскость действия касательных напряжений становится плоскостью размещения осей нормальных напряжений. При этом одинаковое (но в противоположных направлениях) в обеих квазимоделях отклонение осей *P* от горизонтального положения затрудняло ранжирование обстановок их формирования. Вынесение на приведенный разрез данных решения механизма очага №1 сбросового типа показывает, что его элементы (проекции нодальных плоскостей и осей напряжений) строго укладываются в ранее выделенные сектора (Рис. 16*е*). Отмечается полное соответствие проекций сбросовых нодальных плоскостей положению плоскостей

той из взбросовых квазимоделей, которая усредняет значения параметров очагов $\mathbb{N} \ge \mathbb{N} = \mathbb{N} \ge \mathbb{N} \ge \mathbb{N} = \mathbb{N} \ge \mathbb{N} = \mathbb{N} \ge \mathbb{N} = \mathbb{N} = \mathbb{N} \ge \mathbb{N} = \mathbb{N} =$

Особенности проявления инверсионных обстановок сжатия и растяжения в юго-западном-северо-восточном направлении иллюстрируются соотношением решений механизмов очагов №№ 10 и 15 (Рис. 16ж, з). Это единственные землетрясения ланных кинематических обстановок, характеризующиеся первичными – взбросовым и сбросовым – деформационными режимами, поскольку результаты решения механизмов остальных очагов (№№19 и 30 – взбрососдвигового, №№5,16 и 18 – взбросо-сбросового типов в Табл. 1) отражают наличие трансформаций поля напряжений. Косвенным определенных критерием корректности этого положения являются максимальные (по сравнению с другими, В сформировавшимися данных кинематических условиях) магнитуды землетрясений №№10 и 15 (*M*w =5.8 и *M*w=4.9, соответственно). Сопоставительный анализ решений механизмов этих очагов показывает:

1. Проекции «активных» осей P и T находятся в юго-западном секторе стереограммы в непосредственной близости (на угловом удалении в 12°) друг от друга (Рис. 16*ж*, *з*). Их наклон несколько больше, чем в квазимоделях субмеридионального сжатия и растяжения, и составляет в среднем около 20°. Разница в ориентировках сжимающих и растягивающих напряжений (показаны стрелками по внешнему контуру стереограммы) равняется 14°, не превышая величины допустимых погрешностей.

2. На стереограмме (Рис. 16*ж*) падающие в юго-западном направлении нодальные плоскости (идентифицируемые, соответственно, как взброс и сброс) имеют близкие ориентировки и углы падения. Более того, проекции нодальных плоскостей, в структурно-кинематическом отношении являющихся антиподами (взброс и надвиг, сформировавшиеся в обстановке сжатия, и сбросы, обусловленные условиями растяжения) полностью совпадают в плоскости разреза: максимальная разница в углах наклона проекций плоскостей, падающих в одном направлении, составляет 2÷4° (Рис. 163).

3. Величины углов между центрами всех секторов разреза, образуемых совокупностями проекций осей и нодальных плоскостей, составляют 42÷48° (Рис. 163), характеризуя незначительное отклонение последних от идеального распределения – (45±3)°.

Таким образом, в решениях механизмов очагов №№10 и 15 разворот тензора напряжений примерно на 90° (Рис. 16*ж*) вокруг промежуточной оси (при полном совмещении проекций нодальных плоскостей и противоположных «активных»

осей) отражает инверсию кинематических обстановок сжатия-растяжения, действующих в юго-западном-северо-восточном направлении.

Третье положение касается особенностей в распределении осей напряжений первичного поля регионального сейсмогенеза. Отмечая близкое к горизонтальному положение «активных» осей В квазимоделях и/или основных очагах нетрансформированного поля напряжений (Рис. 16), все же следует отметить, что в условиях диагонального сжатия и растяжения этот угол несколько больше, достигая 18÷22°, в то время как в ортогонально ориентированных системах он составляет менее 10° (Рис. 17). С одной стороны, это различие незначительно и сопоставимо с величиной допустимых погрешностей, особенно для построений, основанных на недостаточно представительном статистическом материале. С другой стороны, приведенные значения углов наклона «активных» осей получены путем аппроксимации решений механизмов реальных очагов соответствующих типов сейсмогенеза, и какие-либо исключения из числа данных, приведенных на Рис. 17, отсутствуют.



Рис. 17. Особенности распределения углов наклона «активных» осей напряжений первичного поля в процессе регионального сейсмогенеза. *Условные обозначения:* 1–2 – оси *Р* для квазимоделей взбросового (1) и сдвигового (2) деформационных режимов; 3–4 – оси *Т* для квазимоделей сбросового (3) и сдвигового (4) режимов.

Учитывая вышесказанное, вполне допустимо полагать, что существует некоторая тенденция в распределении ориентировок «активных» осей вдоль ортогональных и диагональных направлений. А именно, тензоры первичных полей напряжений диагональной ориентировки в регионе характеризуются небольшим наклоном осей сжатия и растяжения (преимущественно в южном направлении), в то время как в обстановках действия ортогональных систем эти же оси практически горизонтальны. Аналогичная закономерность просматривается и в распределении ориентировок осей сжатия в моделях сейсмогенеза других исследуемых сегментов Средиземноморского пояса (Рис. 2).

Это обстоятельство позволяет еще раз обратиться к проблеме иерархического соотношения ортогонально и диагонально ориентированных первичных полей напряжений. Данные, приведенные на Рис. 17, позволяют отнести поля напряжений ортогонального сжатия-растяжения к системам более высокого иерархического уровня по сравнению с таковыми диагональной ориентировки, поскольку последние отражают наличие некоторых трансформаций, выраженных в более значительных отклонениях направлений «активных» осей от горизонтального положения.

Таким образом, результаты анализа соотношения основных параметров сейсмогенеза, обусловленного влиянием сжимающих и растягивающих напряжений, действующих в одном направлении, указывают на то, что при инверсии кинематических обстановок сохраняются основные особенности структурообразующих полей напряжений вплоть до незначительного наклона главных осей по отношению к горизонтальной поверхности в диагонально ориентированных системах.

Четвертое положение отражает некоторые результаты идентификации сейсмогенных разрывов в качестве системного элемента современной геодинамики региона. Сопоставление параметров нодальных плоскостей в системах однонаправленного сжатия и растяжения показывают, что в очагах, формирующихся в результате воздействия первичных полей напряжений в условиях взбросового и сбросового деформационных режимов, наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов являются одни и те же сегменты (сектора) разрезов, соответствующие направлениям действия максимальных касательных напряжений в земной коре для той или иной кинематической обстановки (Рис. 166, е, з). Это обстоятельство в известной мере предопределяет особенности деформирования геологической среды в условиях горизонтального случаях образуются сжатия и растяжения: в обоих (активизируются) преимущественно одни и те же системы плоскостей разрывов, при этом в обстановках сжатия они проявляются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения.

Реальная картина, отражающая в каждом отдельном случае результаты структурно-кинематической идентификации нодальных плоскостей и условия их залегания, намного сложнее. Это обусловлено существенной анизотропией изучаемой геологической среды региона, многообразием проявления геодинамических обстановок, наличием трансформаций первичных систем напряжений и, наконец, допусками, неизбежными при реконструкции обстановок в каждом из очагов, что в совокупности существенно усложняет тренд, намеченный при использовании данных, аппроксимируемых квазимоделями сейсмогенеза для разных обстановок. Тем не менее, представляется возможным обосновать некоторые закономерности пространственного распределения сейсмогенных разрывов в исследуемых очагах региона. Эта задача может быть решена лишь в той позволяют выполнить мере. в какой это результаты выполненного сейсмотектонического анализа и их представительность, поскольку сам исходный материал (решения механизмов очагов) допускает двойственное толкование положения реальных сейсмогенных разрывов в очаге, не указывая, какая из

соответствует нодальных плоскостей реальному разрыву. Практически повсеместное проявление разнообразных обстановок сейсмогенеза в регионе и приуроченности отсутствие исключительно однотипных механизмов к определенным геоструктурным элементам не позволяет априори отождествлять пространственно-кинематические параметры сейсмогенных разрывов и известных геоструктур и/или сейсмогенных зон, в пределах которых или в непосредственной близости от которых эти очаги локализованы. Более того, в работах [17, 28] на основе использования азимутальных годографов Р-волн показано, что в очагах землетрясений процесс разрывообразования нередко является двунаправленным. Также следует учитывать, что в самой методике решения механизмов очагов [22] сейсмогенных разрывов отвечает взаимно положение перпендикулярным нодальным плоскостям, которые совпадают с плоскостями действия главных касательных напряжений, а оси Р и Т расположены по отношению к ним под углом 45° в центрах образуемых ими квадрантов. В реальности же деформирование может происходить посредством образования систем разрывов и под углом, меньшим 45° по отношению к направлению действия оси сжатия.

В некоторых случаях определить, какая из нодальных плоскостей соответствует реальному разрыву в очаге, позволяют результаты изучения запаздывания времени пробега $P_{\rm max}$ в определенных азимутах по отношению к очагу. Результаты применения данной методики для некоторых землетрясений Крымско-Черноморского региона, приведенные в работах [17, 18, 28], как правило, показывают значимую степень соответствия полученных азимутов разрывов и ориентировок простираний одной (а в случаях двунаправленного разрыва – и обеих) нодальных плоскостей из решений механизмов соответствующих очагов.

Учитывая вышесказанное, в контексте современной геодинамики региона можно наметить некоторые общие особенности разрывообразования в очагах, формирование которых обусловлено различными кинематическими обстановками. В качестве сейсмогенных разрывов рассматриваются нодальные плоскости, которые по тем или иным признакам являются более предпочтительными, учитывая дополнительные сейсмологические данные (например, азимутальные годографы *P*-волн) или геолого-структурную позицию конкретного землетрясения.

Так, в условиях субмеридионального сжатия, по-видимому, превалируют взбросы и надвиги субширотной или общекавказской ориентировки с падением сместителя в южных румбах. В пользу этого свидетельствуют как направления разрывов, определенные по азимутальным годографам *P*-волн в некоторых очагах (№№13, 20 и 26 в Табл. 1, Рис. 3) и согласующиеся с ориентировкой падающих на юг нодальных плоскостей, так и относительно системный характер в распределении пространственных параметров предполагаемых разрывов (Рис. 18).

На юго-восточном фланге региона очаги взбросового типа (№№17, 20, 28, 29 и 35) локализованы в пределах относительно узкой зоны северо-восточного простирания (Рис. 18). Данное распределение аналогично упорядоченному расположению эпицентров землетрясений с $K_{\Pi} \ge 10$ вдоль линеамента северо-восточного простирания (Южнобережной зоны) в процессе подготовки землетрясения 16.08.1990 г. с Mw = 4.7 [32]. Поскольку магнитуды рассматриваемых

взбросовых очагов характеризуются довольно высокими значениями (в основном, Mw > 4.0), зону их локализации также можно рассматривать в качестве одного из сейсмических линеаментов (который логично обозначить как Синопско-Анапская сейсмогенная зона), формирующих преимущественно диагональный характер распределения сейсмичности в регионе. Все предполагаемые разрывы Синопско-Анапской зоны имеют западно-северо-западное (общекавказское) простирание, согласующееся с общим структурным рисунком Большого Кавказа.



Рис. 18. Предполагаемое положение сейсмогенных разрывов в очагах землетрясений, обусловленных обстановками субмеридионального сжатия (черное) и растяжения (серое). Затенены сейсмогенные зоны: 1 – Южнобережная, 2 – Одесско-Синопская, 3 – Синопско-Анапская, 4 – Сфанту-Георгиевская (цифры в квадратах). Остальные условные обозначения см. на Рис. 3.

Обусловленные обстановками субмеридионального растяжения очаги сбросового типа, локализованные на северо-восточном фланге региона (в районе г. Анапы, №№22, 25), и, в частности, их нодальные плоскости с северным падением (Рис. 18), вполне вероятно отражают процесс периодической активизации южного борта Индоло-Кубанского прогиба. При этом не исключается возможность активизации в очаге №22 и сброса с южным падением, поскольку угол его наклона совпадает с таковыми для взбросовых нарушений. То есть, в условиях проявления инверсионных режимов сжатия-растяжения в пределах данного сегмента земной активизироваться разломы с близкими пространственными коры ΜΟΓΥΤ параметрами, но являющиеся антиподами структурно-кинематическом В отношении.

В пределах северо-западного шельфа Черного моря и к югу от Крыма (в границах Южнобережной сейсмогенной зоны) при субмеридиональном сжатии

образование разрывов в очагах происходило в виде взбросов (№№13, 14, 26) субширотного простирания также с падением на юг, что подтверждается направлениями, установленными для некоторых событий по азимутальным годографам *P*-волн.

Для полноты картины и сохранения объективности геодинамического истолкования результатов анализа сейсмогенного разрывообразования отметим, что в очаге №14 вторая нодальная плоскость, идентифицируемая как левый сдвигонадвиг (надвиг с существенной сдвиговой составляющей), имеет северо-восточное простирание с падением на северо-запад (Рис. 18). Таким образом, ее характеристика пространственно-кинематическая вполне согласуется С представлениями о наличии современного поддвига (субдукции, квазисубдукции) Черноморской плиты под сооружения Горного Крыма [2, 5, 6 и др.]. Но даже если предположить. что в данном очаге в качестве сейсмогенного разрыва активизировалась именно эта нодальная плоскость, приведенный пример является единственным из всей выборки и отражает всего лишь многообразие проявлений процесса сейсмогенного разрывообразования, а не геодинамическую ситуацию в целом. Тем более, что угол наклона всей сейсмогенной зоны в южном направлении соответствует углу падения мегарегиональной геоструктуры сбросового типа (17÷20°), идентифицируемой как граница Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты [33], указывая на то, что основные разрывные зоны Крымского региона периодически активизируются, главным образом, в виде системы сингенетичных листрических сбросов.

Весьма показательными с геодинамической точки зрения являются проявления сейсмогенеза сдвигового типа (Рис. 18), два из которых обусловлены обстановками субмеридионального растяжения (№№4, 11), а одно сформировалось в условиях субмеридионального регионального сжатия (№33). В структурном отношении к ним можно отнести также очаг взбросового типа №12, поскольку одна из его нодальных плоскостей, наиболее выраженная по азимутальному годографу, представляет собой пологий правый сдвиг северо-западной ориентировки. Данные землетрясения локализованы в центральной и западной частях региона – к югу от Горного Крыма, на северном фланге Западно-Черноморской впадины и на границе Северной Добруджи с Преддобруджским прогибом. Сейсмогенные разрывы в их очагах свидетельствуют о современной активности разноранговых тектонических нарушений северо-западного направления в условиях инверсии кинематических обстановок. Левосдвиговые смещения (очаги №№4, 11) отражают активизацию, соответственно, зон Одесско-Синопского и Сфанту-Георгиевского разломов под воздействием субмеридионально ориентированных растягивающих напряжений. Положение очага №33 и ориентировка одной из его нодальных плоскостей (NP1) соответствуют юго-восточному продолжению зоны Салгиро-Октябрьского разлома, которая активизировалась в обстановке субмеридионального сжатия. В сходных условиях был сформирован и очаг №12 взбросового типа с той разницей, что, вследствие его приуроченности к краевой части зоны динамического влияния Одесско-Синопского разлома, произошла локальная трансформация тензора напряжений, обусловившая наклонное положение и преимущественно сдвиговый

характер плоскости основного разрыва (*NP2*). Кроме того, в этом очаге одновременно произошел еще один разрыв по типу левого сдвиго-взброса субширотной ориентировки, на что указывает наличие второго максимума соответствующего азимутального годографа [17].

Сейсмогенез ортогонально ориентированных кинематических обстановок дополняют три очага взбросового типа (№№23, 27 и, согласно уточненным данным, – № 31в Табл. 1), которые однозначно указывают на проявление *субширотного* сжатия (Рис. 5, 6*a*). Их нодальные плоскости имеют весьма близкие параметры и идентифицируются как меридионально ориентированные надвиги восточной вергентности (в обоих очагах – это *NP2*) и взбросы северо-северо-западного простирания с падением на восток (*NP1*). Полученный азимутальный годограф для землетрясения №23 указывает на более вероятную активизацию второго из указанных направлений. Поскольку данные очаги локализованы на северном фланге вала Андрусова, можно полагать, что решения их механизмов отражают процесс периодического погружения восточного края Западно-Черноморской впадины под вал Андрусова или, более того, что сам вал был сформирован в результате этой коллизии.

Заключительное положение касается особенностей сейсмотектонической структурно-кинематической идентификации или 30H с повышенной концентрацией очагов землетрясений. В настоящее время представления о пространственных параметрах и кинематике сейсмогенных зон нередко формируются на основании упорядоченного расположения эпицентров (а в покровно-надвиговых моделях – гипоцентров) землетрясений вдоль разрывных геоструктур разного типа, масштаба и генезиса. При этом в случае противоречивых природы этих геоструктур, сейсмогенным толкований зонам зачастую присваиваются те характеристики, которые отражают геодинамические предпочтения самого исследователя. Подобный подход – прямое отождествление параметров сейсмогенной механизмов очагов землетрясений. зоны И локализованных в ее пределах, с параметрами пространственно совмещенной с ними разломной геоструктуры – используется практически повсеместно, что нередко приводит к ошибочному толкованию современных геодинамических процессов.

Результаты сравнительного анализа решений механизмов очагов, относимых к одной сейсмогенной зоне, как правило, свидетельствуют о влиянии различных кинематических обстановок на формирование этих землетрясений, что было показано на примере вышеописанных фрагментов Средиземноморского пояса. Так, в системе Загрос это различие обусловило двойственную (правосдвиговую и взбросо-надвиговую) природу последней [23, 25], а также ее сложную внутреннюю структуру. В пределах Вранча наличие различных обстановок формирования сейсмогенеза и упорядоченный (в виде нескольких локализованных зон разных кинематических типов) характер его проявления послужили основанием для отказа от определения «зона Вранча» в пользу обозначения ее как «область Вранча» [24, 25]. Приведенные примеры показывают, что представления о сейсмотектонической природе зон повышенной концентрации очагов должны формироваться, опираясь

не только на пространственное распределение последних, но и на особенности проявления кинематических обстановок и деформационных режимов сейсмогенеза, которые устанавливаются по результатам анализа данных о разрывообразовании в очагах и очаговых зонах, полученных методами инструментальной сейсмологии и, главным образом, при решении механизмов очагов землетрясений.

Это положение применимо и к Южнобережной сейсмогенной зоне. Из Табл. 1 и графических построений с привлечением данных по решениям механизмов очагов, локализованных в ее пределах, видно, что за последние 100 лет, прошедшие с момента катастрофического крымского землетрясения 1927 года, в пределах этой зоны проявлялись кинематические обстановки как разнонаправленного сжатия, так и ориентированного в разных направлениях растяжения. При этом очаги формировались в широком диапазоне деформационных режимов; пространственные и структурно-кинематические параметры нодальных плоскостей свидетельствуют как о наличии надвигов (взбросов) и сбросов субширотной и диагональных ориентировок с преобладающим падением их в южных румбах, так и о развитии разноориентированных сдвиговых и близких к ним типов сейсмогенных деформаций. Таким образом, представленные данные указывают на гетерогенный характер и сложное внутреннее строение Южнобережной зоны, что пока не позволяет уверенно обосновать принадлежность этой зоны или отдельных ее фрагментов к какому-либо одному типу сейсмогенеза. Возможно, решению этой задачи в недалеком будущем послужат новые данные о процессах в очагах региона, которые получены авторами и в настоящее время находятся в обработке. Тем не менее, учитывая характеристики нодальных плоскостей, рассматриваемых в качестве возможных сейсмогенных разрывов (из которых, как отмечалось выше, только одна, протягиваясь параллельно берегу Крыма и идентифицируемая как надвиг, падает в северо-западном направлении), представляется маловероятным, чтобы доминирующим геодинамическим фактором, определяющим особенности строения Крыма и прилегающих территорий, являлись современные процессы поддвига, субдукции или квазисубдукции Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров.

выводы

Результаты анализа кинематических обстановок сейсмогенеза в Крымско-Черноморском регионе и особенностей проявления сейсмогенерирующих полей напряжений, реконструированных по данным решений механизмов очагов землетрясений, позволяют обосновать следующие выводы:

1. Основные особенности сейсмогенного разрывообразования в регионе аналогичны таковым в пределах Загроса, Вранча и Кавказа и предопределены избирательным характером проявления современных полей напряжений, который выражается в «секторальном» и «поясном» распределении ориентировок «активных» осей *P* и *T* в квазимоделях разных типов сейсмогенеза. Первое свойство указывает на концентрацию осей структурообразующих полей напряжений в пределах секторов ортогональных и диагональных направлений. Второе

определение отражает: а) преимущественно горизонтальное положение «активных» осей в очагах и квазимоделях, обусловленных влиянием первичных (сдвигового, взбросового и сбросового типов) полей, свидетельствуя о доминирующем влиянии тангенциальных напряжений на процессы сейсмогенного разрывообразования в регионе; б) приуроченность осей максимального растяжения (в некоторых очагах, сформировавшихся в условиях трансформированных систем) к поясу 35÷50° на стереограмме без нарушения вышеуказанных секторальных ограничений.

2. Корректность разделения сейсмогенерирующих систем напряжений и, соответственно, деформационных режимов на первичные (нетрансформированные, обусловившие формирование очагов сдвигового, взбросового и сбросового типов), вторичные (трансформированные, представляющие комбинаторные И их сочетания), подтверждает сравнение энергетических параметров землетрясений разных типов. Установлено, что предельные значения магнитуд для сдвиговых, взбросовых и сбросовых землетрясений в регионе существенно выше, чем для остальных типов сейсмогенеза, реализовавшихся в аналогичных кинематических обстановках но обусловленных влиянием трансформированных систем напряжений.

3. Инверсионный характер структурообразующих полей предопределил закономерности сейсмогенного разрывообразования в регионе, установленные по соотношению ориентировок «активных» осей и положению нодальных плоскостей сейсмогенеза, обусловленных в проявлениях влиянием сжимающих И растягивающих напряжений, периодически действующих в одном направлении. 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 для той или иной кинематической обстановки. Это обстоятельство предопределило особенности деформирования геологической среды в условиях горизонтального в обоих случаях образуются (активизируются) сжатия и растяжения: 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.

4. Установлено, что первичные поля напряжений диагональных ориентировок в регионе характеризуются некоторым наклоном «активных» осей сжатия и растяжения (преимущественно в южном направлении), в то время как в ортогональных системах эти оси практически горизонтальны. Аналогичная закономерность просматривается и в распределении ориентировок осей сжатия в моделях сейсмогенеза других исследуемых сегментов Средиземноморского пояса. Данное обстоятельство дает основание обратиться к проблеме иерархического соотношения ортогонально и диагонально ориентированных первичных полей, позволяя отнести напряжения ортогонального сжатия и растяжения к системам более высокого ранга (иерархического уровня) по сравнению с таковыми диагональной ориентировки, предполагая наличие некоторых трансформаций

последних, выраженных в отклонениях направлений «активных» осей от горизонтального положения.

5. Структурно-кинематическая характеристика и параметры вероятных разрывов, соответствующих положению нодальных плоскостей в решениях механизмов очагов и в квазимоделях разных типов сейсмогенеза, указывают на возможность возникновения (активизации) широкого спектра тектонических нарушений в регионе и на некоторую упорядоченность в их пространственном распределении. В условиях субмеридионального сжатия формируются взбросы и надвиги субширотной ориентировки с падением сместителя преимущественно в южных румбах. На юго-восточном фланге региона они приурочены к Синопско-Анапской сейсмогенной зоне северо-восточного простирания; предполагаемые разрывы в этих очагах имеют общекавказское простирание, согласующееся с общим структурным рисунком Большого Кавказа. Локализованные на северном фланге вала Андрусова очаги взбросового типа, обусловленные обстановками периодического субширотного сжатия, по-видимому, отражают процесс погружения восточного края Западно-Черноморской впадины, указывая на то, что вал Андрусова был сформирован в результате этой коллизии. Проявления сейсмогенеза сдвигового типа являются следствием активизации разноранговых разломных зон северо-западного простирания (Одесско-Синопской, Сфанту-Георгиевской, Салгиро-Октябрьской) в условиях инверсионных обстановок сжатия и растяжения, предопределивших смещения крыльев этих зон как по левому, так и по правому сдвигу. Сейсмогенные разрывы в очагах сбросового типа, формирование которых происходило в обстановках регионального растяжения, действующего субмеридиональном диагональных направлениях, в И свидетельствуют о продолжающейся активизации структур северной части континентального склона Черноморской впадины и южного борта Индоло-Кубанского прогиба. В первом случае разрывы реализуются в виде сбросов с южным и юго-восточным падением, во втором – с северным падением, в сторону осевой части прогиба.

6. Многообразие кинематических обстановок, реконструированных в очагах Южнобережной сейсмогенной зоны, указывает на ее гетерогенный характер и сложное внутреннее строение, что не позволяет обосновать принадлежность этой зоны или отдельных ее фрагментов к какому-либо одному типу сейсмогенеза. В ее пределах проявлялись обстановки как разнонаправленного сжатия, так и ориентированного в разных направлениях растяжения; при ЭТОМ очаги Южнобережной сейсмогенной зоны формировались в широком диапазоне деформационных режимов. Учитывая структурно-кинематические характеристики и параметры нодальных плоскостей, рассматриваемых в качестве возможных сейсмогенных разрывов, а также характер обусловивших их полей напряжений, представляется маловероятным, чтобы доминирующим геодинамическим фактором, определяющим особенности строения Крыма и прилегающих территорий, являлись современные процессы поддвига, субдукции или квазисубдукции Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров.

7. Количественные соотношения проявлений разных типов деформационных режимов в процессах современного сейсмогенного и новейшего тектонического разрывообразования (соответственно, в пределах Черного моря и Горного Крыма) несколько различаются. В первом случае доминируют взбросовые и сбросовые деформационные режимы при относительно слабом проявлении сейсмогенеза сдвигового типа. Во втором – основная роль принадлежит сдвиговым и сбросовым режимам и, соответственно, структурам, сформировавшимся в этих условиях, в то время как разрывы взбросо-надвигового типа имеют подчиненное значение [30]. Это различие обусловлено положением изучаемых объектов в структуре региона, поскольку сейсмогенное разрывообразование тяготеет к области перехода от континентальной земной коры большой мощности к редуцированной коре субокеанического типа или к участкам ее преимущественного развития. Изменение характера деформаций от сдвиговых к взбросо-надвиговым отражает наличие зональности процессов разрывообразования в направлении от Крымского полуострова к центру Черноморской впадины. Обратная тенденция наблюдается по направлению к основным сейсмогенерирующим структурам турецкого побережья Черного моря, где сдвиговый характер деформаций в пределах очаговых зон является весьма распространенным.

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

Список литературы

- Дискуссия по концептуальным вопросам геодинамики Крымско-Черноморского региона // Геодинамика Крымско-Черноморского региона. Сборник материалов конференции / Отв. ред. Б. Г. Пустовитенко. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 1997. С. 135–148.
- 2. Юдин В. В. Геодинамика Крыма. Симферополь: Национальная академия природоохранного и курортного строительства. Симферополь: УкрГГРИ, ДИАЙПИ, 2011. 336 с.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Борисенко Л. С., Поречнова Е. И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // Геофизический журнал. 1999. Т. 21, N6. С. 3–15.
- Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплекту карт OCP-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах / Гл. ред. В. И. Уломов, М. И. Богданов; сост.: В. И. Уломов, М. И. Богданов, В. Г. Трифонов, А. А. Гусев и др. // Инженерные изыскания, 2016. N 7. С. 49–121.
- Юдин В. В. Геодинамика Крыма и последствия землетрясений // Геодинамические исследования в Украине. Киев: Изд. Ин-та геофизики НАНУ, 1995. С. 36–44.
- Юдин В. В., Юровский Ю. Г. Неогеодинамика Крымско-Черноморского региона // Строительство и техногенная безопасность. Сборник научых трудов. Симферополь: Нац. академия природоохранного и курортного строительства, 2011. С. 50–56.
- Пустовитенко Б. Г. Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма: дис. ... докт. физ.-мат. наук: 04.00.22. Киев: Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, 2003. 387 с.
- 8. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е. Сейсмичность Черноморской впадины // Геофизический журнал, 1991. Т. 13, N 1. С. 14–19.
- Пустовитенко А. А. Сейсмологические основы прогноза сейсмической опасности территории юга Украины: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 04.00.22. Киев: Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, 2008. 139 с.

- Пустовитенко А. А. Каталог механизмов очагов землетрясений Крыма за 2009 год // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. Обнинск: ФГБУН ГС РАН, 2017. Приложение на CD_ROM
- 11. Пустовитенко А. А. Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2011 год // Землетрясения Северной Евразии в 2011 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2017. Приложение на CD_ROM.
- Пустовитенко А. А., Пустовитенко Б. Г., Мержей Е. А. Механизм и динамические параметры очага землетрясения 5 октября 2007 года в северо-восточной части Черного моря // Сейсмологический бюллетень Украины за 2011г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2012. С. 62–70
- Пустовитенко Б. Г. Тектонические напряжения в земной коре Крымского региона по данным об очагах слабых землетрясений // Геофизический сборник АН УССР, 1977. Вып. 78. С. 15–23.
- 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.
- Пустовитенко Б. Г., Уточненные очаговые параметры землетрясений Крыма 1990 года // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. Серия «География». 2014. Том 27(66), N4. С.169–178.
- Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е., Горячун А. В. Землетрясения Крымско-Черноморского региона. Киев: Наукова думка, 1989. 192 с.
- Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А, Капитанова С. А. Экспериментальные данные о процессах в очагах черноморских землетрясений // Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2007. С. 152–163.
- Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Скляр А. М., Князева В. С. Змеиное землетрясение 5 мая 2008 г. с К_П=12.7, Mc=5.1, Mw=4.8, I₀=5-6 (северо-западная часть шельфа Черного моря, Украина) //Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 313–325.
- Габсатарова И. П., Малянова Л. С., Селиванова Е. А., Якушева В. Н. Землетрясение 10 декабря 2012 г. с *Мw* = 4.6 вблизи г. Анапы // Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013. С. 35–45.
- Пустовитенко Б. Г. Очаг ощутимого землетрясения в Крыму 5 июля 1984 года с *Мw*=4.3 // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология, 2017, Т.3 (69), N2. С. 207–217.
- Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона 2016 года // Учёные записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология, 2017, Т.3 (69), N 4. С. 51–69.
- 22. Введенская А. В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
- Вольфман Ю. М. Структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных зон системы Загроса (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Геофизический журнал, 2013. Т. 35, N2. C. 38–64.
- 24. Вольфман Ю. М., Колесникова Е. Я. Сейсмотектоника очаговой области Вранча // Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы: Материалы XIX научно-практической конференции с международным участием / Под ред. Е. А. Рогожина, Л. И. Надежка. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2014. С. 85–89.
- Volfman Yu. M., Kolesnikova E. Ya., Pustovitenko B. G., Milyukov V. K.. Selective Manifestation of Seismogenic Stress Field within the Mediterranean Belt (Based on Earthquake Focal Mechanism Solutions) // Journal of Volcanology and Seismology, 2017. Vol. 11, no. 6, pp. 447–461.
- Гущенко О. И., Мострюков А. О., Петров В. А. Структура поля современного регионального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса // Доклады АН СССР, 1991. 312, N4. С. 830–835.
- 27. Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: «Феникс», 2005. 572 с.

- Пустовитенко Б. Г., Капитанова С. А. К вопросу об изучении современной геодинамики Черного моря по очаговым параметрам землетрясений // Геодинамика Крымско-Черноморского региона: Сб. материалов конференции / Отв. ред Б. Г. Пустовитенко. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 1997. С.112–115.
- 29. Вольфман Ю. М., Колесникова Е. Я. Надвиговые структуры гетерогенного основания крымского сегмента Скифской плиты (по результатам интерпретации скоростной модели профиля ГСЗ DOBRE-5) // Глубинное строение, минерагения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов: Материалы XX всероссийской конференции с международным участием / Под ред. Н. М. Чернышева, Л. И. Надежка. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. С. 107–112.
- Вольфман Ю.М. Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма. 2 // Геофизический журнал, 2015. Т. 37, N1. C. 100–120.
- 31. Вольфман Ю. М. О влиянии кинематических обстановок на цикличность геологических процессов в пределах Крыма и Северного Причерноморья в течение альпийского этапа // Геофизический журнал. 2008. Т. 30, N5. С. 101–114.
- 32. Пустовитенко Б. Г., Лущик А. В., Боборыкина О. В., Кульчицкий В. Е., Можжерина А. В., Насонкин В. А., Панков Ф. Н., Поречнова Е. И., Пустовитенко А. А., Тихоненков Э. П., Швырло Н. И. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ Гидрофизика», 2014. 264 с.
- 33. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Y., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and Crimean peninsula //Geophysical Journal International. 2015, no. 201, pp. 406–428.

SITUATIONS OF SEISMOGENESIS OF THE CRIMEAN-BLACK- SEA REGION (ACCORDING TO DECISIONS OF EARTHQUAKE FOCUS MECHANISMS)

Volfman Yu. M., Pustovitenko B. G., Kolesnikova E. Ya., Ostanin A. M.

Institute of Seismology and Geodynamics FSAEI HE «Of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University», Simferopol, Republic of Crimea, Russia

E-mail: seism.volf@gmail.com

On the example of Crimea-Black sea region the article substantiates a variety of manifestations of seismogenesis as a consequence of the influence of rather variable systems of tectonic stress, which is characterized, at the same time, by the selectivity of the orientations of the main axes. The stereographic models of seismogenesis are presented; it is shown that the variety of environments of seismogenesis is the result of transformation of stress fields occurring at both the regional and local levels.

The limiting values of earthquake magnitudes, which were formed under the influence of primary stress fields, are significantly higher than for transformed ones. It is shown that under the influence of inverse compressive and tensile stresses, which periodically act in the same direction, systems of seismogenic discontinuities with the same spatial parameters are formed; but in compression settings, they appear as reverse faults and thrusts, and in the presence of tension, as faults.

It is also found that the primary stress fields of diagonal orientations are characterized by a weak inclination of the axes of compression and tension, and in orthogonal systems these axes are almost horizontal. Therefore, the stresses of orthogonal compression and tension are assigned to systems of a higher hierarchical level compared to the stress fields of diagonal orientation. Some seismogenic fractures are identified as system elements of the structure and geodynamics of the region.

It is proved that the South Coast seismogenic zone has a complex structure: the focal mechanisms within it reflect the diversity of structural-kinematic types of seismogenesis. Analysis of the foci mechanisms of the South Coastal Zone showed that the ideas about the dominant influence of modern processes of subduction of the East Black Sea Plate under the Crimean Peninsula are unfounded.

Keywords: seismogenesis, stress field, stereographic models, earthquake focal mechanisms, kinematic situation.

References

- 1. Diskussiya po konceptual'nym voprosam geodinamiki Krymsko-Chernomorskogo regiona // Geodinamika Krymsko-Chernomorskogo regiona. Sbornik materialov konferencii /Otv. red. B. G. Pustovitenko. Sevastopol': NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 1997, pp. 135–148 (in Russian).
- 2. Yudin V. V. Geodinamika Kryma. Simferopol': Nacional'naya akademiya prirodoohrannogo i kurortnogo stroitel'stva. Simferopol': UkrGGRI, DIAJPI, 2011, 336 p. (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E., Borisenko L. S., Porechnova E. I. Obshchee sejsmicheskoe rajonirovanie territorii Kryma (OSR-98) // Geofizicheskij zhurnal. 1999, T. 21, no. 6, pp. 3–15 (in Russian).
- Obshchee sejsmicheskoe rajonirovanie territorii Rossijskoj Federacii. Poyasnitel'naya zapiska k komplektu kart OSR-2016 i spisok naselennyh punktov, raspolozhennyh v sejsmoaktivnyh zonah / Gl. red. V. I. Ulomov, M. I. Bogdanov; sost.: V. I. Ulomov, M. I. Bogdanov, V. G. Trifonov, A. A. Gusev i dr. // Inzhenernye izyskaniya, 2016, no. 7, pp. 49–121 (in Russian).
- 5. Yudin V. V. Geodinamika Kryma i posledstviya zemletryasenij // Geodinamicheskie issledovaniya v Ukraine. Kiev: Izd. Institutata geofiziki NANU, 1995, pp. 36–44 (in Russian).
- Yudin V. V., Yurovskij Yu. G. Neogeodinamika Krymsko-Chernomorskogo regiona // Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'. Sbornik nauchnyh trudov. Simferopol': Nac. akademiya prirodoohrannogo i kurortnogo stroitel'stva, 2011, pp. 50–56 (in Russian).
- Pustovitenko B. G. Sejsmicheskie processy v Chernomorskom regione i sejsmicheskaya opasnosť Kryma: dis. ... dokt. fiz.-mat. nauk: 04.00.22. Kiev: Institut geofiziki im. S. I. Subbotina NAN Ukrainy, 2003, 387 p. (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E. Sejsmichnost' Chernomorskoj vpadiny // Geofizicheskij zhurnal. 1991, T. 13, no. 1, pp. 14–19 (in Russian).
- Pustovitenko A. A. Sejsmologicheskie osnovy prognoza sejsmicheskoj opasnosti territorii yuga Ukrainy: dis. ... kand. fiz.-mat. nauk: 04.00.22. Kiev: Institut geofiziki im. S. I. Subbotina NAN Ukrainy, 2008, 139 p. (in Russian).
- Pustovitenko A. A. Katalog mekhanizmov ochagov zemletryasenij Kryma za 2009 god // Zemletryaseniya Severnoj Evrazii, 2009 god. Obninsk: FGBUN GS RAN, 2017. Prilozhenie na CD_ROM (in Russian).
- Pustovitenko A. A. Katalog mekhanizmov ochagov zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona za 2011 god // Zemletryaseniya Severnoj Evrazii v 2011 godu. Obninsk: FIC EGS RAN, 2017. Prilozhenie na CD_ROM (in Russian).
- Pustovitenko A. A., Pustovitenko B. G., Merzhej E. A. Mekhanizm i dinamicheskie parametry ochaga zemletryaseniya 5 oktyabrya 2007 goda v severo-vostochnoj chasti Chernogo morya // Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2011g. Sevastopol': NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2012, pp. 62–70 (in Russian).

- Pustovitenko B. G. Tektonicheskie napryazheniya v zemnoj kore Krymskogo regiona po dannym ob ochagah slabyh zemletryasenij // Geofizicheskij sbornik AN USSR, 1977, Vyp. 78, pp. 15–23 (in Russian).
- Pustovitenko B. G. Mekhanizm ochagov oshchutimyh zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona poslednih 20 let // Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2000 god. Sevastopol': NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2002, pp. 59–64 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Utochnennye ochagovye parametry zemletryasenij Kryma 1990 goda // Uchenye zapiski Tavricheskogo nacional'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Seriya «Geografiya». 2014, T. 27(66), no. 4, pp.169–178 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E., Goryachun A. V. Zemletryaseniya Krymsko-Chernomorskogo regiona. Kiev: Naukova dumka, 1989, 192 p. (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A, Kapitanova S. A. Ehksperimental'nye dannye o processah v ochagah chernomorskih zemletryasenij // Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2005 god. Sevastopol': NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2007, pp. 152–163 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A., Sklyar A. M., Knyazeva V. S. Zmeinoe zemletryasenie 5 maya 2008 g. s K_P=12.7, *Mc*=5.1, *Mw*=4.8, *I*₀=5–6 (severo-zapadnaya chast' shel'fa Chernogo morya, Ukraina) //Zemletryaseniya Severnoj Evrazii, 2008 god. Obninsk: GS RAN, 2014, pp. 313–325 (in Russian).
- Gabsatarova I. P., Malyanova L. S., Selivanova E. A., Yakusheva V. N. Zemletryasenie 10 dekabrya 2012 g. s *Mw* = 4.6 vblizi g. Anapy // Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2012 g. Sevastopol': NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2013, pp. 35–45 (in Russian).
- Pustovitenko B. G. Ochag oshchutimogo zemletryaseniya v Krymu 5 iyulya 1984 goda s Mw=4.3 // Uchyonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya, 2017, T.3 (69), no. 2, pp. 207–217 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Ehredzhepov E. E. Ochagovye parametry zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona 2016 goda // Uchyonye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya, 2017, T.3 (69), no. 4, pp. 51–69 (in Russian).
- 22. Vvedenskaya A. V. Issledovaniya napryazhenij i razryvov v ochagah zemletryasenij pri pomoshchi teorii dislokacij. M.: Nauka, 1969, 136 p. (in Russian).
- Vol'fman Yu. M. Strukturno-kinematicheskaya identifikaciya sejsmogennyh zon sistemy Zagrosa (po dannym reshenij mekhanizmov ochagov zemletryasenij) // Geofizicheskij zhurnal, 2013. T. 35, no. 2. pp. 38–64 (in Russian).
- Vol'fman Yu. M., Kolesnikova E. Ya. Sejsmotektonika ochagovoj oblasti Vrancha // Aktivnye razlomy i ih znachenie dlya ocenki sejsmicheskoj opasnosti: sovremennoe sostoyanie problemy: Materialy XIX nauchno-prakticheskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem /Pod red. E. A. Rogozhina, L. I. Nadezhka. Voronezh: Izdatel'sko-poligraficheskij centr «Nauchnaya kniga», 2014, pp. 85–89 (in Russian).
- Yu. M. Volfman, E. Ya. Kolesnikova, B. G. Pustovitenko, V. K. Milyukov. Selective Manifestation of Seismogenic Stress Field within the Mediterranean Belt (Based on Earthquake Focal Mechanism Solutions) // Journal of Volcanology and Seismology, 2017. Vol. 11, no. 6, pp. 447–461 (in English).
- Gushchenko O. I., Mostryukov A. O., Petrov V. A. Struktura polya sovremennogo regional'nogo napryazheniya sejsmoaktivnyh zon zemnoj kory vostochnoj chasti Sredizemnomorskogo aktivnogo poyasa // Doklady AN SSSR, 1991. 312, no. 4, pp. 830–835 (in Russian).
- 27. Gintov O. B. Polevaya tektonofizika i ee primenenie pri izuchenii deformacij zemnoj kory Ukrainy. Kiev: «Feniks», 2005, 572 p. (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Kapitanova S. A. K voprosu ob izuchenii sovremennoj geodinamiki Chernogo morya po ochagovym parametram zemletryasenij // Geodinamika Krymsko-Chernomorskogo regiona: Sb. materialov konferencii / Otv. red B. G. Pustovitenko. Sevastopol': NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 1997, pp. 112–115 (in Russian).
- 29. Vol'fman Yu. M., Kolesnikova E. Ya. Nadvigovye struktury geterogennogo osnovaniya krymskogo segmenta Skifskoj plity (po rezul'tatam interpretacii skorostnoj modeli profilya GSZ DOBRE-5) // Glubinnoe stroenie, minerageniya, sovremennaya geodinamika i sejsmichnost' Vostochno-Evropejskoj platformy i sopredel'nyh regionov: Materialy HKH vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem / Pod red. N. M. Chernysheva, L. I. Nadezhka. Voronezh: Izdatel'sko-poligraficheskij centr «Nauchnaya kniga», 2016, pp. 107–112 (in Russian).

- Vol'fman Yu.M. Deformacionnye rezhimy i kinematicheskie obstanovki novejshego tektonicheskogo razryvoobrazovaniya v predelah Gornogo Kryma. 2 // Geofizicheskij zhurnal, 2015. T. 37, no. 1, pp. 100–120 (in Russian).
- Vol'fman Yu. M. O vliyanii kinematicheskih obstanovok na ciklichnosť geologicheskih processov v predelah Kryma i Severnogo Prichernomor'ya v techenie al'pijskogo ehtapa // Geofizicheskij zhurnal. 2008. T. 30, no. 5, pp. 101–114 (in Russian).
- Pustovitenko B. G., Lushchik A. V., Boborykina O. V., Kul'chickij V. E., Mozhzherina A. V., Nasonkin V. A., Pankov F. N., Porechnova E. I., Pustovitenko A. A., Tihonenkov E. P., Shvyrlo N. I. Monitoring sejsmicheskih processov v Krymsko-Chernomorskom regione. Sevastopol': NPC «EHKOSI-Gidrofizika», 2014, 264 p. (in Russian).
- Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Yu., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and Crimean peninsula //Geophysical Journal International. 2015, no. 201, pp. 406–428 (in English).