

УДК 550.348.435

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО- ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Вольфман Ю. М.¹, Пустовитенко Б. Г.², Колесникова Е. Я.³

^{1,3}Институт сейсмологии и геодинамики, Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Российская Федерация.

²ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», Симферополь, Российская Федерация.

E-mail: ¹seism.volf@gmail.com, ²bpustovitenko@mail.ru

Приведены результаты исследования кинематических обстановок и деформационных режимов сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона. Применен метод тектонофизического анализа разрывов и смещений в очагах землетрясений. Используются имеющиеся решения механизмов очагов землетрясений региона по состоянию на 2022 год. Построены стереографические квазимодели сейсмогенеза, которые аппроксимируют значения параметров фокальных механизмов, соответствующих разным типам кинематических обстановок. Установлены основные особенности локальных трансформаций сейсмогенирующих полей напряжений. Рассмотрены случаи возможного отражения процессов сейсмогенного разрывообразования в особенностях геологического строения и современного развития Крыма и прилегающих территорий.

Ключевые слова: сейсмогенез, поля напряжений, оси напряжений, фокальные механизмы землетрясений, кинематические обстановки, трансформации полей напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Со времени публикации работы, в которой были проанализированы кинематические обстановки и деформационные режимы сейсмогенного разрывообразования Крымско-Черноморского региона [1], произошло существенное (почти на 50%) пополнение регионального каталога решений механизмов очагов [2–5 и др.], который в настоящее время насчитывает 52 события. При этом для некоторых из ранее рассматриваемых событий авторами были уточнены параметры фокальных механизмов. Наличие нового фактического материала расширило возможности исследования процессов сейсмогенеза с применением методов тектонофизического анализа. Учитывая вышесказанное, целью настоящей работы является анализ сейсмогенирующих полей напряжений региона с использованием всех новых данных, а также верификация ранее полученных выводов об особенностях проявления регионального сейсмогенеза и проверка корректности применяемых в процессе тектонофизического анализа методических приемов.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАННЫХ

Общий уровень сейсмичности Крымско-Черноморского региона несколько ниже, чем в пределах остальной части периферии Черного моря – на Кавказе, в Турции или Румынии, а периоды повторяемости сильных и катастрофических землетрясений здесь более длительные, чем в указанных регионах. Это

обстоятельство отразилось как на репрезентативности выборки данных по решениям механизмов очагов для Крымско-Черноморского региона, так и на фактологическом наполнении самих решений ввиду ограниченной возможности регистрации первых вступлений от землетрясений с невысокими магнитудами (особенно в период до 2000 г. при аналоговом способе регистрации малым числом сейсмических станций). Тем не менее, имеющийся материал позволяет получить весьма значимые сведения о сейсмогенерирующих полях напряжений, которые согласуются с закономерностями, ранее установленными в пределах других сегментов Средиземноморского пояса [6].

В процессе тектонофизического анализа сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона задействовано 52 решения механизмов очагов (т. е. все, имеющиеся на момент подготовки настоящей работы, табл. 1). Решения механизмов очагов выполнены на основе теории дислокации в рамках модели двойного диполя без момента по стандартной методике [7, 8] с использованием знаков первых вступлений сейсмических волн на станции регистрации.

Таблица 1.

Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона

№ п/п	Дата	Координаты очага			M _w	Нодальные плоскости		Оси главных напряжений			Деф. режим
		φ°N	λ°E	h, км		NP1/ DP	NP2/ DP	P/PL	N/PL	T/PL	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
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	Сд-сб
6*	1955-1975	44.2	34.2	15	2.5	75/15	301/80	134/54	29/11	292/34	Сд-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	Сд-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	05.07.1984	44.49	34.46	18	4.3	154/71	262/49	122/13	225/43	19/44	В-сд
13	03.03.1986	43.52	31.69	18	4.3	166/80	58/29	188/30	81/26	318/48	В
14	02.04.1988	44.98	32.01	13	4.2	170/58	32/40	188/10	94/22	301/66	В
15	02.07.1990	44.78	34.53	14	4.3	183/59	311/44	160/08	254/28	55/61	В

**НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ
МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА**

Продолжение таблицы 1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
16	16.08.1990	44.7	35.06	28	4.9	234/65	22/29	81/67	317/14	223/18	Сб
17	25.07.1991	43.12	31.3	11	4.0	181/11	29/80	215/55	118/05	24/35	Сд-сб
18	29.03.1992	45.3	31.0	33	4.3	212/87	353/04	35/48	302/02	210/42	Сд-сб
19	27.08.1992	44.72	37.44	24	4.6	225/35	355/66	14/17	277/23	136/61	В
20	22.11.1996	44.51	34.16	10	3.2	97/79	195/54	61/16	173/52	320/34	В-сд
21	09.06.1997	43.31	35.85	22	4.6	206/50	356/44	192/03	283/15	91/74	В
22	18.10.1998	44.05	33.68	22	4.9	329/81	73/33	304/29	53/32	181/45	В-сд
23	02.06.1999	44.59	34.48	19	4.0	161/65	272/54	129/07	225/43	32/46	В-сд
24	08.08.1999	44.71	37.71	37	3.8	182/57	348/34	27/77	268/07	176/12	Сб
25	04.03.2001	43.06	35.37	20	4.7	273/39	60/56	71/09	342/17	192/71	В
26	09.11.2002	44.82	37.7	29	5.6	330/50	82/66	113/10	14/41	213/48	В-сд
27	13.03.2005	44.72	37.14	6	4.4	134/41	8/59	240/59	78/29	344/08	Сб
28	07.02.2006	44.46	34.33	13	3.4	10/72	217/20	176/62	283/09	17/27	Сб
29	05.10.2007	44.56	37.08	18	4.3	215/55	11/38	205/09	297/12	78/75	В
30	07.05.2008	45.34	30.95	11	4.8	171/45	353/45	352/00	82/01	262/89	В
31	04.07.2008	45.31	31.01	30	3.7	274/46	73/46	264/00	354/10	174/80	В
32	12.04.2009	44.16	34.23	20	4.3	276/45	70/48	82/02	352/13	181/76	В
33	17.03.2011	43.39	36.13	31	4.1	209/28	16/63	20/18	289/05	183/71	В
34	09.09.2011	44.39	34.34	20	3.5	215/63	20/28	51/71	302/06	210/18	Сб
35	30.01.2012	44.66	36.83	17	3.6	17/47	133/65	161/10	63/30	265/52	В
36	10.12.2012	44.83	37.54	24	4.3	27/76	132/45	247/43	104/40	356/19	Сб-сд
37	01.05.2013	44.64	36.6	11	3.8	130/58	263/43	3/64	203/25	109/08	Сб
38	15.10.2013	44.53	34.35	7	3.7	121/55	271/38	108/08	200/15	350/72	В
39	09.12.2013	44.49	34.34	17	3.5	122/56	270/39	108/09	201/16	350/72	В
40	02.03.2014	44.30	34.33	28	4.1	134/57	274/41	5/68	210/21	117/06	Сб
41	18.10.2014	42.74	35.11	16	3.8	32/77	296/64	72/09	326/60	167/28	Сд
42	16.08.2015	44.56	37.39	7	3.8	257/45	66/45	162/84	342/06	252/0	Сб
43	13.05.2016	44.63	34.41	13	3.6	73/71	333/63	205/33	14/56	116/05	Сб-сд
44	28.06.2016	42.46	31.59	35	4.1	155/54	338/36	156/09	66/02	325/81	В
45	22.07.2016	42.35	34.95	25	4.3	356/48	212/48	14/00	284/19	104/71	В
46	15.10.2016	42.22	30.72	8	5.1	146/47	326/43	146/02	236/00	335/88	В
47	22.07.2017	44.72	36.74	9	4.0	352/55	195/37	02/09	270/11	130/76	В
48	31.01.2018	44.74	37.14	10	4.0	351/75	238/35	135/50	270/31	15/23	Сб-сд
49	24.04.2018	44.86	37.56	33	4.0	221/46	58/46	229/00	139/09	319/81	В
50	09.09.2018	44.49	35.80	35	3.9	236/54	38/37	93/78	319/09	228/09	Сб
51	13.09.2018	44.42	34.41	29	3.7	184/48	328/48	76/71	256/19	166/00	Сб
52	15.10.2018	46.30	37.24	6	4.1	04/46	164/46	354/00	84/11	264/80	В

Примечания к табл. 1: 1) типы деформационных режимов: Сб — сбросовый, В — взбросовый, Сд — сдвиговый, В-сд — взбросо-сдвиговый, Сб-сд — сбросо-сдвиговый, Сд-сб — сдвиго-сбросовый; 2) параметры нодальных плоскостей и осей главных напряжений: азимут падения/угол падения; 3) звездочками () обозначены композитные механизмы, полученные путем усреднения значений параметров локальных групп очагов слабых ($M \leq 2.5$) землетрясений.*

Землетрясения, для которых были получены решения механизмов очагов, неравномерно рассредоточены в пределах всего региона — от прибрежной части Северной Добруджи (на западе) до района Нижней Кубани (на востоке) в полосе широт $\varphi=42\div 46^\circ\text{N}$. Большая их часть тяготеет к области континентального склона южнее Крымского полуострова и к зоне сочленения Индо-Кубанского прогиба с Туапсинской впадиной. Эти области максимальной концентрации очагов землетрясений обозначены, соответственно, как Южнобережная и Туапсинско-Анапская сейсмогенные зоны (рис. 1). В меньшем количестве получены решения механизмов для землетрясений, локализованных в пределах северо-западного шельфа Черного моря, в Западно-Черноморской впадине и в районе Центрально-Черноморского поднятия (вал Андрусова).

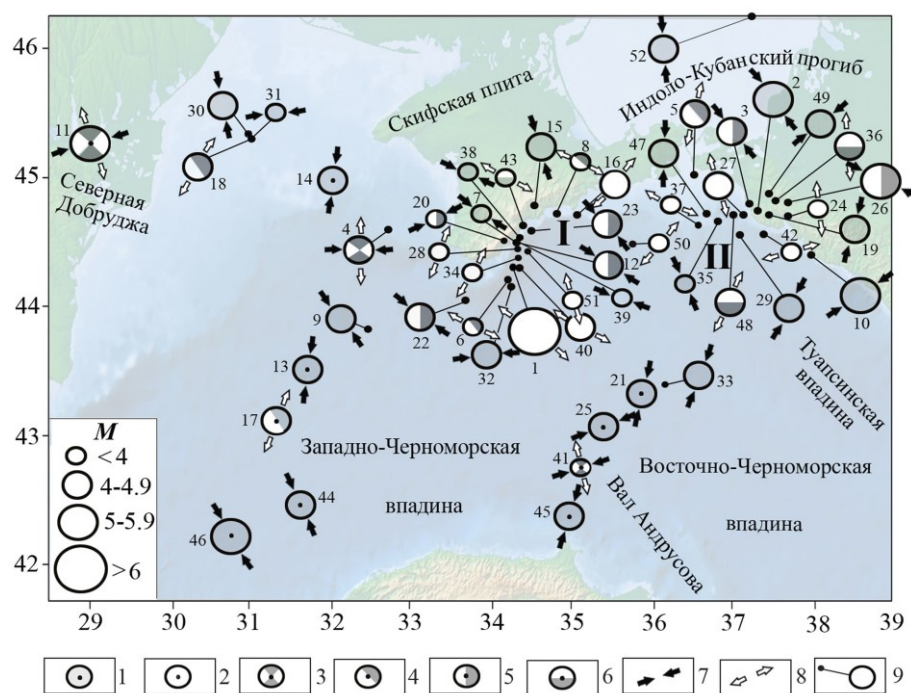


Рис. 1. Схема размещения землетрясений Крымско-Черноморского региона, для которых получены решения механизмов очагов. Условные обозначения: 1–6 — тип деформационного режима в очаге (1 — взбросовый, 2 — сбросовый, 3 — сдвиговый, 4 — сдвиго-сбросовый, 5 — взбросо-сдвиговый, 6 — сбросо-сдвиговый); 7–8 — направление действия напряжений, обусловивших кинематические обстановки формирования очагов (7 — сжатия, 8 — растяжения); 9 — очаги, снесенные от их местоположения; размер пуансонов пропорционален магнитуде землетрясения (врезка в левом нижнем углу). Арабские цифры — номера очагов в табл. 1; римские цифры — области максимальной концентрации очагов землетрясений (основные сейсмогенные зоны): I — Южнобережная, II — Туапсинско-Анапская.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Характер распределения очагов, отражающих различные условия формирования и деформационные режимы, указывает на многообразие обстановок сейсмогенеза в регионе, с одной стороны, и на отсутствие приуроченности исключительно однотипных фокальных механизмов к определенным геоструктурным элементам – с другой. Это обусловлено, на наш взгляд, не столько недостаточной статистической представительностью анализируемого материала (решений механизмов очагов) для такого сложного в геологическом отношении сегмента литосферы, каким является Черное море и прилегающие территории, сколько неравновесным состоянием рассматриваемой геодинамической системы.

Из 52-х анализируемых фокальных механизмов 49 отражают условия формирования разрывов и смещений в очагах конкретных землетрясений. В трех случаях (6*, 7*, 8* в табл. 1) представлены решения композитного механизма для локальных групп очагов слабых сейсмических событий с $M_w \leq 2.5$, полученные по совокупности знаков первых вступлений продольных волн на сейсмические станции Крыма с использованием методики [9]. Примененный при этом метод расчета тензора среднего механизма [10] основан на постулате о подобии процессов сеймотектонического течения в пространственно компактной зоне очагов относительно слабых землетрясений, приуроченных к определенным геологическим структурам.

В исследуемой выборке 30 очагов взбросового и взбросо-сдвигового типов отражают обстановки сжатия, действующего в разных направлениях; 19 фокальных механизмов сбросового и остальных деформационных режимов свидетельствуют об условиях разноориентированного регионального растяжения. Формирование 3-х сдвиговых очагов было равновероятно как в обстановках сжатия, так и в условиях растяжения (табл. 2).

Таблица 2.

Распределение идентифицированных механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона по магнитудам и деформационным режимам

<i>Обстановки</i> Деформационные режимы	Магнитуды M_w				Σ
	4.0	4.0-4.9	5.0-5.9	≥ 6.0	
<i>Региональное сжатие</i>					
Взбросовый	6	15	3	-	24
Взбросо-сдвиговый	1	4	1	-	6
<i>Всего</i>	7	19	4	-	30
<i>Региональное растяжение</i>					
Сбросовый	6	4	-	1	11
Сдвиго-сбросовый	2	3	-	-	5
Сбросо-сдвиговый	2	1	-	-	3
<i>Всего</i>	10	8	-	1	19
<i>Рег. сжатие или растяжение</i>					
Сдвиговый	1	1	1	-	3
<i>Итого</i>	18	28	5	1	52

Большая часть землетрясений исследуемой выборки является коровыми: очаги 43-х из них сформировались на глубинах до 30 км, 7-ми — в интервале от 30 до 40 км. Два события (12.07.1966 г. с $h=55$ км — №2 и 17.04.1975 г. с $h=46$ км — №9¹ в табл. 1), учитывая возможные погрешности определения глубины очага, могут рассматриваться, как пограничные — нижнекоровые или верхнемантийные.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ; ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ПОНЯТИЯ

Методологическую основу тектонофизического анализа региональной выборки фокальных механизмов составил способ построения стереографических моделей, предложенный и апробированный в процессе изучения сейсмогенного разрывообразования в пределах отдельных сегментов Средиземноморского пояса, для которых имелись вполне статистически представительные данные – в Загросе, Вранча и других [6, 11, 12]. В ходе исследований было установлено, что при сопоставлении решений механизмов очагов значения их параметров (ориентировки нодальных плоскостей со сходными траекториями подвижек, проекции векторов смещений и осей главных напряжений), как правило, образуют обособленные скопления в пределах ограниченных сегментов стереограмм. Позиции этих совокупностей зачастую настолько различаются между собой, что каждая из них априори может рассматриваться как следствие разных условий сейсмогенного разрывообразования, которые проявляются:

— в разных *кинематических обстановках*, отражающих воздействие напряжений сжатия или растяжения в регионе и особенности ориентировок их главных осей относительно сторон света;

— в многообразии *деформационных режимов* разрывообразования (классификация и описание которых приведены ниже) в очагах анализируемых землетрясений.

Эти факторы заложены в основу унификации сейсмогенерирующих полей напряжений для групп очагов, характеризуемых общностью кинематических обстановок и деформационных режимов. При этом очаги, имеющие близкие (соответствующие одному полю напряжений) пространственно-кинематические параметры, в процессе обработки объединялись в *структурно-кинематические парагенезисы сейсмогенных разрывов и смещений* (далее — структурно-кинематические парагенезисы или парагенезисы), отражение которых на стереограмме рассматривалось в качестве *стереографической модели* соответствующего типа сейсмогенеза. Пример одного из таких построений для системы Загрос приведен на рисунке 2. В отдельных случаях такая модель могла быть получена путем усреднения значений параметров нескольких парагенезисов, характеризующих общую для них кинематическую обстановку. При закономерном

¹ Чтобы не перегружать изложенное, далее в тексте при ссылке на то или иное землетрясение из табл. 1 приводится, как правило, только его порядковый номер без указания даты события и остальных параметров (если таковые не являются предметом специального рассмотрения).

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

и/или компактном расположении землетрясений, фокальные механизмы которых были аппроксимированы одной моделью, последняя рассматривалась и в качестве стереографической модели сейсмогенной или очаговой зоны.

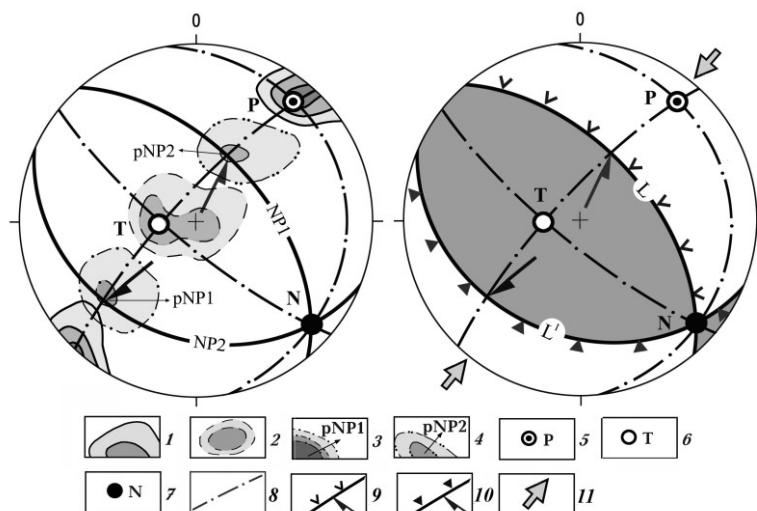


Рис. 2. Пример построения стереографической модели сейсмогенеза взбросового типа системы Загрос для кинематической обстановки юго-западно–северо-восточного сжатия (по [11], фрагмент). Условные обозначения: 1–4 — изолинии плотностей параметров решений механизмов очагов: осей максимального (1) и минимального (2) сжатия, полюсов нодальных плоскостей $NP1$ (3) и $NP2$ (4); 5–7 — проекции осей главных напряжений (5 — максимального сжатия, 6 — минимального сжатия, 7 — промежуточной); 8 — проекции плоскостей размещения осей главных напряжений; 9–10 — нодальные плоскости и их структурно-кинематическая характеристика — взбросы (9), надвиги (10), стрелками указано направление перемещения лежачего крыла разрыва; 11 — реконструированное направление регионального сжатия.

Идентификация деформационных режимов в очагах выполнялась в соответствии с классификацией О. И. Гущенко и др. (табл. 3), в основу которой заложены соотношения углов наклона осей главных напряжений [13, 14]. Прообразом этой классификации принято считать положение Е. М. Андерсона о том, что для земной коры одно из главных нормальных напряжений, как правило, является субвертикальным, а два других — субгоризонтальными [15], обуславливая возникновение 3-х основных типов разрывов. При субвертикальном положении оси сжатия² (применительно к фокальным механизмам — оси P) образуются сбросы, при

² Правильнее сказать, что, вообще говоря, ось P — это «ось максимального сжатия или минимального растяжения»; аналогичное замечание относится и к оси T , которая является «осью максимального растяжения или минимального сжатия». Какая из этих составляющих

таком же положении промежуточной оси N — сдвиги; для взбросов (или надвигов) субвертикальной является ось T . Соответствующие деформационные режимы разрывообразования (сбросовый, сдвиговый и взбросовый в табл. 3) отнесены (по [14]) к «идеальным».

Таблица 3.

Величины углов наклона осей главных напряжений для различных деформационных режимов (по [13, 14] с изменениями; адаптировано применительно к параметрам решений механизмов очагов землетрясений)

1	Взбросовый	$P \leq 30^\circ$	$N \leq 30^\circ$	$T \geq 45^\circ$
2	Сбросовый	$P \geq 45^\circ$	$N \leq 30^\circ$	$T \leq 30^\circ$
3	Сдвиговый	$P \leq 30^\circ$	$N \geq 45^\circ$	$T \leq 30^\circ$
4	Взбросо-сдвиговый	$P \leq 30^\circ$	$N > 30^\circ$	$T > 30^\circ$
5	Сбросо-сдвиговый	$P > 30^\circ$	$N > 30^\circ$	$T \leq 30^\circ$
6	Сдвиго-сбросовый	$P > 45^\circ$	$N < 30^\circ$	$45^\circ < T \leq 30^\circ$
7	Сдвиго-взбросовый	$45^\circ < P \leq 30^\circ$	$N < 30^\circ$	$T > 45^\circ$
8	Октаэдрический	$P > 30^\circ$	$N > 30^\circ$	$T > 30^\circ$

Поля напряжений, обусловившие проявления этих режимов, нами отнесены к категории *первичных, нетрансформированных*, в отличие от *вторичных (трансформированных)* систем напряжений, способствующих возникновению остальных деформационных режимов – взбросо-, сбросо-сдвигового и других. Это положение подтверждается и количественными соотношениями проявлений сейсмогенеза соответствующих типов как в Крымско-Черноморском регионе (табл. 2), так и пределах Средиземноморского пояса.

Отметим, что в классификацию [13, 14] нами были внесены изменения, так как один из приведенных в ней деформационных режимов, а именно – «взбросо-сбросовый» (с углами наклона осей $P > 30^\circ$, $N < 30^\circ$, $T > 30^\circ$), содержал противоречие в самом его определении, поскольку мог одновременно отражать противоположные условия сейсмогенеза. Безусловно, в авторской трактовке классификации [13, 14], речь идет *не о типе смещения* «взбросо-сброс», какового в природе не существует, а *о типе деформационного режима*, характеризующего противоположные в кинематическом отношении условия разрывообразования. Но дальние плоскости в очагах землетрясений взбросо-сбросового типа идентифицируются или как взбросы (при углах наклона оси P в интервале $30^\circ \div 45^\circ$), или как сбросы (при таких же углах наклона оси T), отражая в первом случае обстановки регионального или локального

является определяющей в каждом конкретном случае, зависит от кинематической обстановки в данный момент в регионе — сжатия или растяжения. Следует учесть, что в обстановках сжатия субвертикальная ось T является только «осью минимального сжатия», так как в природе не существует сколько-нибудь значимых факторов, способных обеспечить растяжение массива в вертикальном направлении, в то время как литостатическое давление (обеспечивающее эффект сжатия в этом же — вертикальном направлении) присутствует постоянно, возрастая с увеличением глубины.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

сжатия, во втором — растяжения. Но дуализм, содержащийся в самом названии режима, во-первых, обуславливал необходимость дополнительных комментариев при рассмотрении каждого конкретного фокального механизма, и, во-вторых, иногда приводил к неверной трактовке сейсмотектоники региона. Так, в работе [16] все очаги Крымско-Черноморского региона, характеризующиеся взбросо-сбросовым режимом, отнесены к разряду «шарьяжных» только на том основании, что одна из нодальных плоскостей является чрезвычайно пологой. Это искажает как кинематическую обстановку формирования сейсмогенеза данного типа, так и геодинамическую картину современного развития исследуемой территории, поскольку в пределах Крымско-Черноморского региона *все без исключения* фокальные механизмы так называемого взбросо-сбросового типа имеют углы наклона оси T в интервале $30^\circ \div 45^\circ$, указывая на то, что соответствующие им очаги возникали в условиях растяжения. Учитывая сказанное, мы сочли необходимым усложнить классификацию, разбив взбросо-сбросовый режим на два типа – *сдвиго-сбросовый* и *сдвиго-взбросовый* (табл. 3), которые однозначно характеризуют обстановки, соответственно, растяжения и сжатия. Их названия предопределены преобладающими структурно-кинематическими типами нодальных плоскостей: в фокальных механизмах первого из этих режимов они представлены сдвиго-сбросами и сбросами, второго — сдвиго-взбросами, взбросами и надвигами.

Как отмечено выше, в процессе анализа регионального сейсмогенеза было установлено, что в выборках фокальных механизмов, отвечающих той или иной кинематической обстановке, выделяются:

1. Совокупности очагов, которые имеют близкие значения основных параметров и характеризуются деформационными режимами, отнесенными (по [14]) к категории «идеальных» – взбросовым, сбросовым и сдвиговым. В количественном отношении в Крымско-Черноморском регионе эти очаги доминируют, составляя 73% от общего числа идентифицированных фокальных механизмов и являясь, таким образом, основными индикаторами кинематических обстановок в регионе при всем их многообразии.

2. Очаги, значения параметров которых существенно отличаются от основной массы фокальных механизмов, отражая проявления «комбинаторных» (взбросо- и сбросо-сдвигового, сдвиго-сбросового) типов деформационных режимов. Такие очаги, составляя всего 27% от общего количества, присущи не всем кинематическим обстановкам: они не проявились в обстановках субмеридионального сжатия, субширотного сжатия и растяжения, а также отсутствуют в выборке фокальных механизмов сдвигового типа.

В первом случае вариации значений основных параметров фокальных механизмов рассматриваются как следствие *флуктуаций* (от лат. *fluctuatio* – колебание, отклонение) основного, первичного (нетрансформированного) поля напряжений, которые не приводят к проявлению «комбинаторных» деформационных режимов разрывообразования. Эти флуктуации учитываются при построении структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений, удовлетворяющих одному полю напряжений и в конечном итоге – являющихся наполнением квазимодели сейсмогенеза для соответствующей этому полю кинематической

обстановки. Кроме естественных флуктуаций первичного поля, причиной подобных отклонений могут быть допуски, неизбежные вследствие ограниченного количества используемых данных, а также особенности методики построения фокальных механизмов. Согласно этой методике [7, 8], в решениях механизмов очагов положение взаимноперпендикулярных (по определению) нодальных плоскостей совпадает с плоскостями действия главных касательных напряжений, то есть под углом 45° к направлению осей нормальных напряжений. При этом не учитывается возможность формирования разрывов в направлениях, учитывающих влияние внутреннего трения в горном массиве, то есть не взаимноперпендикулярных, а отклоняющихся в сторону оси максимального сжатия (или минимального растяжения) на угол $(45-\alpha)^\circ$, где α — угол скалывания. Однако экспериментальные и полевые тектонофизические исследования показывают, что хрупкие деформации в горном массиве довольно часто реализуются именно в этих направлениях, удовлетворяя требованиям теории прочности Ш. Кулона–А. Навье–О. Мора, согласно которой образование сколовых разрывов зачастую происходит под углом, не равным 45° к направлению действия осей нормальных напряжений. В качестве примера, где этот фактор был учтен, можно привести результаты тектонофизической интерпретации (на основе статистически представительных данных) механизмов очагов землетрясений системы Загрос [11, 12].

Во втором случае речь идет об относительно немногочисленных, но существенных изменениях условий сейсмогенного разрывообразования таким образом, что в аналогичной кинематической обстановке происходит значительное усложнение деформационного режима (в виде проявлений «комбинаторных» — сдвига-сбросового, взбросо- и сбросо-сдвигового типов). Это усложнение обусловлено разворотом тензора напряжений, который можно рассматривать как результат локальной *трансформации* (от лат. *transformatio* — «преобразование», «превращение») первичного поля напряжений, а само поле напряжений считать *трансформированным*.

Количественное преобладание очагов, сформированных под воздействием первичных полей напряжений, характерно не только для Крымско-Черноморского региона, а и для всего Средиземноморского складчатого пояса (рис. 3). В пределах его обширного сегмента, охватывающего территории от Атлантического океана до Каспийского моря и от Северной Африки до Центральной Европы включительно (в рамках географических координат: $\lambda=20^\circ\div 60^\circ E$, $\varphi = 20^\circ\div 50^\circ N$), локализовано 1886 землетрясений, произошедших в период с 1976 г. по 2020 г., для которых, по данным Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC), были получены решения механизмов очагов [17]. Результаты их дифференциации по деформационным режимам показали, что 80% очагов образовалось под воздействием первичных полей напряжений, отвечая сбросовому (559 очагов или 29%), сдвиговому (490 очагов, 26%) и взбросовому (464 очага, 25%) типам (рис. 3). И только 20% очагов удовлетворяют трансформированным полям напряжений, будучи сформированными в условиях иных режимов — сбросо-сдвигового (146 очагов или 8%), взбросо-сдвигового (115 очагов, 6%), сдвига-сбросового и сдвига-взбросового (102 очагов, 5%) и октаэдрического (12 очагов, 1%). Эти особенности проявления разных

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

деформационных режимов сейсмогенного разрывообразования predeterminedены общим характером развития нашей планеты — горизонтальными перемещениями литосферных плит, сочленяющихся по системам конвергентных и дивергентных границ, к которым приурочены основные сейсмогенные пояса Земли.

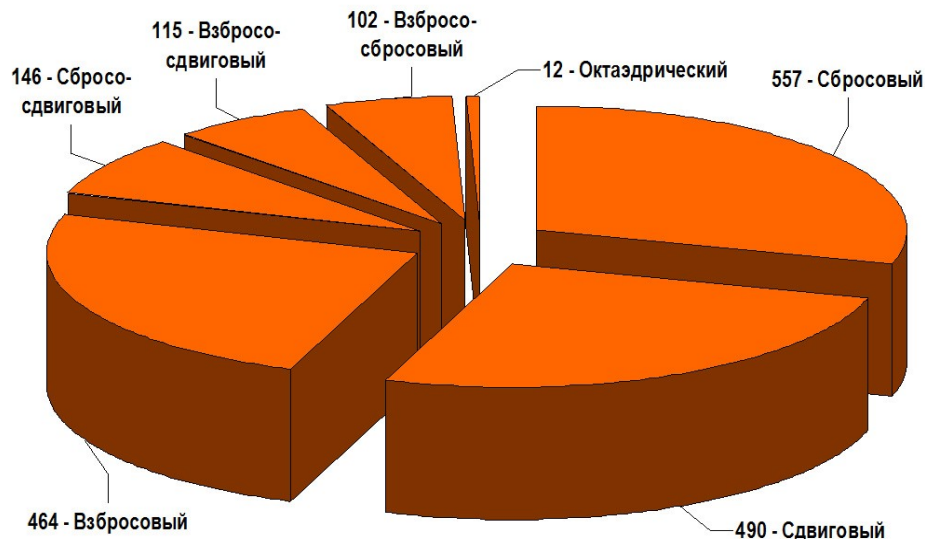


Рис. 3. Распределение фокальных механизмов очагов землетрясений Средиземноморского пояса по типам деформационных режимов сейсмогенного разрывообразования (составлено по данным EMSC [17]).

В этой связи следует отметить, что в указанных пределах Средиземноморского пояса, формирование которого в течение длительного времени было обусловлено коллизионным взаимодействием литосферных плит, процессы современного сейсмогенного разрывообразования отражают доминирующее влияние первичных систем напряжений не взбросового (наиболее характерного для коллизионных процессов), а сбросового и сдвигового типов.

Поскольку каталог решений механизмов очагов для Крымско-Черноморского региона статистически менее представительен, чем соответствующие выборки по вышеупомянутым сегментам Средиземноморского пояса [6, 11, 12], методология построения моделей сейсмогенеза в данном случае имеет существенные ограничения. Тем не менее, при сопоставлении однотипных (по кинематическим обстановкам и деформационным режимам) фокальных механизмов Крымско-Черноморского региона также выявляются определенное сходство между ними и относительная близость значений их основных параметров. Результаты обобщения и усреднения последних позволяют построить некое подобие стереографических моделей для каждого типа сейсмогенеза (по аналогии с Загросом, Вранча и Кавказом), которые, ввиду их недостаточной статистической обеспеченности, можно обозначить как «субмодели» или «квазимодели» [1]. Очевидно, что возможности

статистической оценки параметров этих построений весьма ограничены: для большинства из них основным показателем является размах вариации (угловая разница максимального и минимального значений) и/или отклонение от среднего. Следует также учитывать, что магнитуды анализируемых землетрясений за редкими исключениями (например, землетрясения 11.09.1927 г., $M_w=6.9$, 12.07.1966 г. и 03.09.1978 г. с $M_w=5.8$ в табл. 1) являются относительно невысокими. Соответственно, в самих решениях их механизмов могут содержаться погрешности, увеличивающие дисперсию основных параметров полученных квазимоделей.

Многообразие проявлений сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона позволило выполнить детальный анализ полей напряжений для каждой кинематической обстановки в следующей последовательности:

- дифференциация фокальных механизмов с целью выделения совокупностей с близкими значениями основных параметров, отвечающих первичным и трансформированным полям напряжений;

- параметризация структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений, обусловленных флуктуациями первичного поля в рамках каждой кинематической обстановки, и построение квазимоделей сейсмогенеза; в случае, когда первичному полю напряжений отвечают фокальные механизмы одного парагенезиса, последний рассматривается в качестве квази модели данной обстановки;

- анализ проявлений вторичных полей напряжений, обусловленных трансформациями первичного поля;

- выявление особенностей трансформаций полей напряжений, универсальных для всех кинематических обстановок.

Системный (как будет показано ниже) характер полученных результатов, во-первых, свидетельствует о корректности применяемого (за неимением других возможностей) подхода, во-вторых, существенно расширяет представления об особенностях проявления полей напряжений, обусловивших процессы сейсмогенеза в регионе, и, в-третьих, позволяет внести коррективы в представления о современной геодинамике Крымско-Черноморского сегмента Средиземноморского пояса.

3. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК СЖАТИЯ

Обстановки субмеридионального сжатия идентифицированы в 13-и очагах взбросового типа. По сходству значений их основных параметров они сгруппированы в три структурно-кинематических парагенезиса K1(1), K1(2) и K1(3), которые отражают флуктуации первичного поля напряжений. Параметры парагенезисов и квазимоделей приведены в табл. 4; здесь же указаны номера и типы деформационных режимов (по табл. 1) фокальных механизмов, включенных в состав того или иного парагенезиса и в квази модель данной кинематической обстановки.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Таблица 4.

Результаты аппроксимации (квазимодели, структурно-кинематические парагенезисы) параметров однотипных фокальных механизмов для разных кинематических обстановок

Статус выборки	Ориентировки (азимут/угол) осей главных напряжений			Элементы залегания (азимут/угол падения) и структурно-кинематический тип нодальных плоскостей	
	деформационный режим				
	Номера, типы очагов в составе квазимodelей и парагенезисов				
	<i>P</i>	<i>N</i>	<i>T</i>	<i>NP1</i>	<i>NP2</i>
1	2	3	4	5	6
Кинематические обстановки сжатия					
Обстановки субмеридионального сжатия					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-1	184/04	271/01	2/85	182/48	0/42
	взбросовый			взброс	надвиг
	№№ 13-15, 19, 21, 29, 30, 33, 35, 44, 45, 47, 52 – взбросового типа				
К1(1)	15/05	283/14	118/74	210/42	0/51
	взбросовый			левый сдвиго- надвиг	правый сдвиго- взброс
	№№ 19, 21, 29, 33, 45, 47 – взбросового типа				
К1(2)	181/10	85/15	302/70	166/59	20/37
	взбросовый			левый сдвиго- взброс	правый сдвиго-надвиг
	№№ 13, 14, 30, 52 – взбросового типа				
К1(3)	159/09	68/04	310/80	диагональные и субширотные сдвиго-взбросы, взбросы и надвиги	
	взбросовый				
	№№ 15, 35, 44 – взбросового типа				
Обстановки субширотного сжатия					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-2	91/06	02/02	237/84	271/40	88/40
	взбросовый			надвиг	взброс
	№№ 25, 31, 32, 38, 39 – взбросового типа				
К2(1)	79/04	349/13	182/76	274/43	68/50
	взбросовый			правый сдвиго- надвиг	левый сдвиго- взброс
	№№ 25, 31, 32 – взбросового типа				
К2(2)	108/08	200/15	350/72	122/56	271/39
	взбросовый			правый сдвиго- взброс	левый сдвиго- надвиг
	№№ 38, 39 – взбросового типа				

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5	6
Обстановки юго-восточного–северо-западного сжатия					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-3 = К3(1)	320/01	228/08	58/80	146/44	302/48
	взбросовый			надвиг	взброс
	№№ 2, 7*, 9, 46 – взбросового типа				
<i>Вторичные (трансформированные) поля напряжений</i>					
К3(2)	305/10	46/44	204/43	339/70	85/51
	взбросо-сдвиговый			правый взбросо-сдвиг	левый взбросо- сдвиг
	№№ 3, 22, 26 – взбросо-сдвигового типа				
К3(3)	126/10	225/43	26/45	158/68	268/50
	взбросо-сдвиговый			правый взбросо-сдвиг	левый взбросо- сдвиг
	№№ 12, 23 – взбросо-сдвигового типа				
Обстановки юго-западного–северо-восточного сжатия					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-4 = К4(1)	233/11	139/13	358/71	220/60	70/35
	взбросовый			левый сдвиго- взброс	правый сдвиго- надвиг
	№№ 10, 49 – взбросового типа				
<i>Вторичные (трансформированные) поля напряжений</i>					
К4(2)	61/16	173/52	320/34	97/79	195/54
	взбросо-сдвиговый			правый взбросо-сдвиг	левый сдвиг
	№ 20 – взбросо-сдвигового типа				
Кинематические обстановки растяжения					
Обстановки меридионального растяжения					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-5 = К5(1)	152/79	266/02	356/08	354/54	180/36
	сбросовый			сброс	сброс
	№№ 24, 27, 28, 51 – сбросового типа				
<i>Вторичные (трансформированные) поля напряжений</i>					
№№ 36, 48 – сбросо-сдвигового типа					
Обстановки субширотного растяжения					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-6	162/84	342/06	252/00	257/45	66/45
	сбросовый			сброс	сброс
	№ 42 – сбросового типа				

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Продолжение таблицы 4.					
1	2	3	4	5	6
Обстановки юго-восточного–северо-западного растяжения					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-7= К7(1)	335/74	207/11	114/13	124/58	279/32
	сбросовый			сброс	правый сдвиго-сброс
№№ 1, 37, 40 – сбросового типа					
<i>Вторичные (трансформированные) поля напряжений</i>					
№ 43 – сбросо-сдвигового типа; № 6*, 8* – сдвиго-сбросового типа					
Обстановки юго-западного–северо-восточного растяжения					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-8= К8(1)	75/72	313/10	220/15	207/59	48/30
	сбросовый			сброс	правый сдвиго-сброс
№№ 16, 34, 50 – сбросового типа					
<i>Вторичные (трансформированные) поля напряжений</i>					
К8(2)	42/49	300/11	201/39	212/86	330/14
	сдвиго-сбросовый			сброс	правый сбросо-сдвиг
№5, 18 – сдвиго-сбросового типа					
№17 – сдвиго-сбросового типа					
Кинематические обстановки меридионального растяжения–субширотного сжатия					
Обстановки субмеридионального растяжения–субширотного сжатия					
<i>Первичные (нетрансформированные) поля напряжений</i>					
К-9	79/12	285/77	170/05	214/86	304/78
	сдвиговый			левый сдвиг	правый сдвиг
№№ 4, 11, 41 — сдвигового типа					

Примечание: в столбцах значений осей главных напряжений жирным выделены ориентировки осей *P* и *T*, предопределивших тип кинематической обстановки (сжатия или растяжения).

Стереогаммы парагенезисов К1(1) и К1(2), аппроксимирующие значения параметров соответственно 6-ти (№№ 19, 21, 29, 33, 45, 47) и 4-х (№№ 13, 14, 30, 52) решений механизмов очагов, отражают некоторый разворот тензора напряжений, главным образом, вокруг оси сжатия *P* (рис. 4 *a*, *б*). Оба парагенезиса относятся к взбросовому типу; их нодальные плоскости имеют субширотное простирание и идентифицируются как сдвиго-надвиг и сдвиго-взброс (надвиг и взброс с некоторой сдвиговой составляющей).

Вполне очевидно различие в пространственном распределении очагов данных парагенезисов (рис. 5). Все землетрясения, отнесенные к К1(1), локализованы на восточном фланге Крымско-Черноморского региона – в пределах зоны северо-восточного простирания, трассируемой линией Синоп-Анапа. Напротив, очаги

парагенезиса К1(2) приурочены к разным геоструктурам и расположены, в основном, к западу от Крыма – вдоль $\lambda=31\div 32^{\circ}E$, а одно из этих событий (№52) произошло в Азовском море к северу от Таманского полуострова.

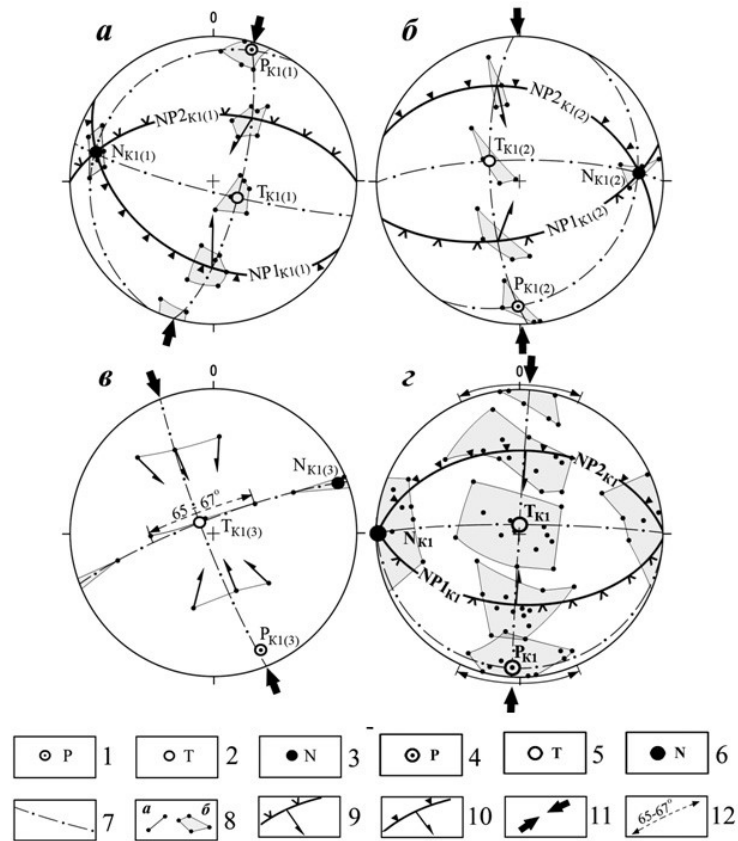


Рис. 4. Парагенезисы К1(1)–К1(3) (а-в) и квазимодель К-1 (з) взбросового типа, обусловленные обстановками субмеридионального сжатия. Условные обозначения: 1–3 — проекции осей главных напряжений для парагенезисов разрывов и смещений (1 — максимального сжатия, 2 — минимального сжатия, 3 — промежуточной); 4–6 — то же самое, для квазимоделей; 7 — проекции плоскостей размещения осей напряжений; 8 — разброс значений одноименных параметров в парагенезисах и квазимоделях, аппроксимирующих данные 2-х (а) и более (б) фокальных механизмов; 9–10 — проекции нодальных плоскостей и их структурно-кинематическая характеристика (9 – взбросы, сдвиго-взбросы, 10 — надвиги), бергштрихи – со стороны падения нодальной плоскости, стрелки — направления перемещения висячего крыла; 11 — направления сжатия; 12 — угловая величина разворота тензора напряжений. Подстрочные индексы — наименование осей напряжений квазимодели и парагенезисов

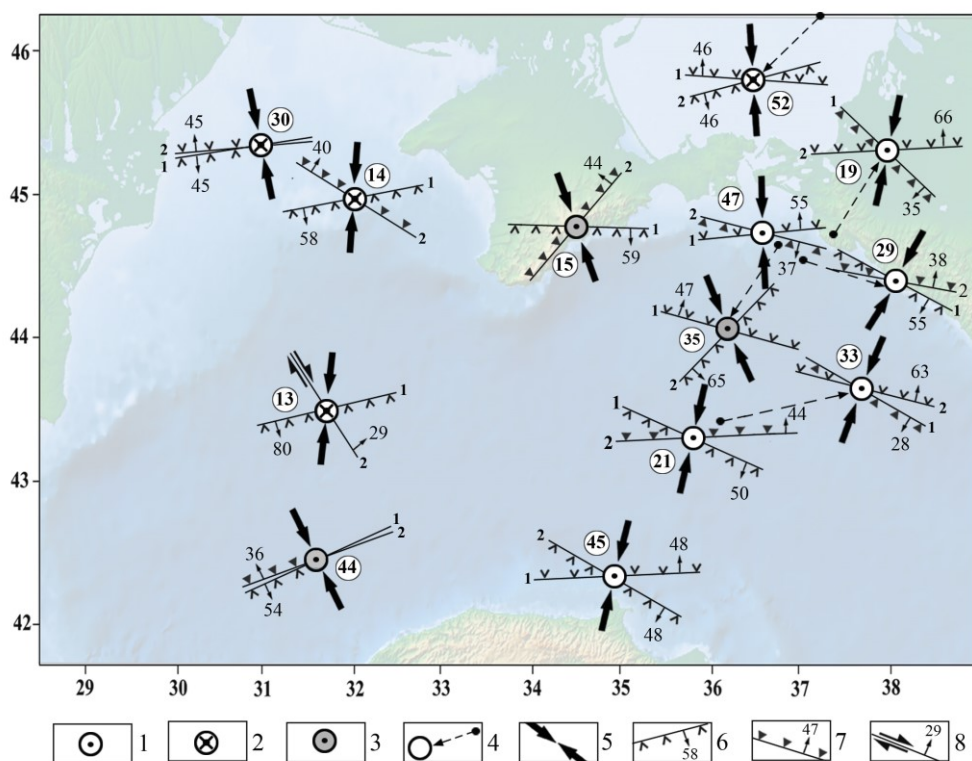


Рис. 5. Расположение очагов землетрясений, обусловленных обстановками субмеридионального сжатия. Условные обозначения: 1 — очаги в составе структурно-кинематического парагенезиса К1(1); 2 — то же самое, для К1(2); 3 — то же самое, для К1(3); 4 — очаги, снесенные по стрелке от их местоположения; 5 — направления сжатия; 6–8 — проекции нодальных плоскостей на горизонтальную поверхность, их номера, углы падения и структурно-кинематические характеристики (6 — взбросы и сдвиго-взбросы, 7 — надвиги, 8 — сдвиги и взбросо-сдвиги, стрелки указывают направление перемещения вдоль них).

Примечание: цифры в кружках — номера очагов в табл. 1; бергштрихи — со стороны падения плоскости.

Основанием для объединения 3-х оставшихся очагов (№№ 15, 35, 44) в парагенезис К1(3) послужило полное совпадение (до первых градусов) ориентировок их осей P , азимуты простирания которых составляют $156\text{--}161^\circ$ при углах падения $8\text{--}10^\circ$. Одиночные очаги этого типа рассредоточены по всему региону (рис. 5): они локализованы в пределах Туапсинско-Анапской и Южнобережной зон, а также на юго-западном продолжении последней — в Западно-Черноморской впадине. Совмещенные на стереограмме параметры их фокальных механизмов являются типичным отражением систем одноосного сжатия [18]. Однако, поскольку стереограмма характеризует не одноактный процесс, а одновременные события, эту

картину следует интерпретировать как следствие локальных флуктуаций регионального поля напряжений, выраженных вращением тензора вокруг оси P (рис. 4 *в*).

Сопоставление результатов построений, приведенных на рисунках 4 *а-в*, указывает на вариативный характер обстановок субмеридионального сжатия, который проявляется в существенном разбросе значений всех параметров, в том числе, и в отклонениях осей сжатия P от меридионального направления в обе стороны. Учитывая, что очаг с максимальной для данного типа обстановок магнитудой (№30, $M_w=4.8$) включен в состав К1(2), данный парагенезис можно было бы рассматривать в качестве «эталона» взбросового режима, аппроксимирующего кинематические обстановки субмеридионального сжатия в регионе.

Но более предпочтительным, отражающим особенности субмеридионального сжатия, является вариант, учитывающий параметры всех 13-ти очагов, сформировавшихся в данной обстановке. Он представлен на рисунке 4 *г* в виде квазимодели **К-1**. В ее основу заложены средние значения ориентировок осей P и N всех фокальных механизмов, а положение субвертикальной оси T определено стереографическими построениями как равноудаленное от них на 90° , чем обеспечивается взаимоперпендикулярность осей тензора напряжений. Несмотря на высокий уровень дисперсии параметров, на стереограмме отчетливо обособлены квадранты максимального и минимального сжатия, а также практически не перекрывающиеся области локализации главных осей и проекций векторов смещений. Подобный прием параметризации тензора напряжений применяется при тектонофизическом анализе разрывов и смещений, характеризующихся большим разбросом значений их параметров [14, 18, 19 и др.]. Следует добавить, что полученная квазимодель практически идентична фокальному механизму №30 с максимальной для землетрясений субмеридионального сжатия магнитудой ($M_w=4.8$).

В геодинамическом отношении интересен факт, что из 13-ти землетрясений, сформированных в условиях субмеридионального сжатия, только одно (№15) расположено на материковой части Крыма, в зоне динамического влияния Молбайского и Южнобережного разломов. При этом по совокупности данных в качестве предполагаемого разрыва в этом очаге рассматривается падающая на юг плоскость $NP1$ субширотного простирания [20]. Остальные же землетрясения с фокальными механизмами данного типа расположены либо намного западнее (между меридианами $\lambda=31\div 32^\circ E$), либо на значительном удалении к востоку от Крыма. То есть, признаков современного поддвига Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров в очаговых параметрах землетрясений, обусловленных обстановками субмеридионального сжатия, не установлено.

Обстановки субширотного сжатия также имели место в пределах региона, хотя и проявились они слабее, чем предыдущие: идентифицировано 5 очагов взбросового типа, отвечающих данной ситуации. Они сгруппированы в два структурно-кинематических парагенезиса (рис. 6 *а, б*), первый из которых – К2(1) – аппроксимирует решения механизмов трех очагов (№№ 25, 31, 32), второй – К2(2) – двух (№№ 38, 39 в табл. 4). Значения параметров фокальных механизмов в каждом

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

их них близки между собой: в первом случае максимальные отклонения от среднего не превышают 8-9°; во втором — параметры практически совпадают, отличаясь не более чем на 1°. Нодальные плоскости обоих парагенезисов в структурно-кинематическом отношении представлены надвигом и взбросом субмеридионального простирания с незначительной сдвиговой составляющей.

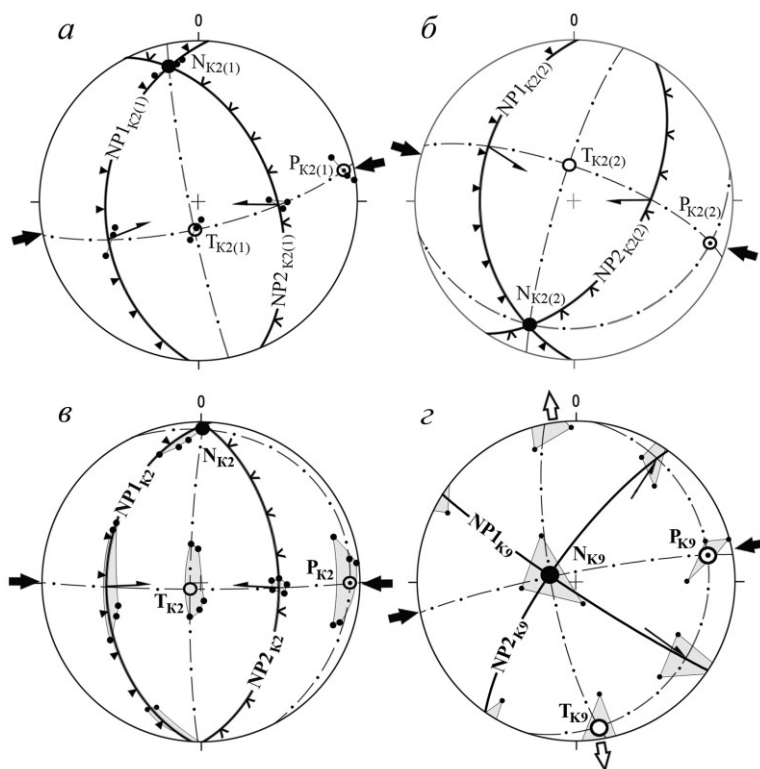


Рис. 6. Результаты аппроксимации обстановок субширотного сжатия (а-в) и субширотного сжатия–субмеридионального растяжения (г): а, б — структурно-кинематические парагенезисы К2(1) и К2(2) взбросового типа; в — квазимодель К-2 взбросового типа; г — квазимодель К-9 сдвигового типа. Условные обозначения — см. на рис. 4.

Очаги парагенезиса К2(1) являются среднекоревыми (глубина $h=20-30$ км) и характеризуются более высоким энергетическим уровнем ($M_w=3.7-4.7$). Они рассредоточены по всему региону (рис. 7): один из них приурочен к Южнобережной сейсмогенной зоне, второй локализован на северном фланге вала Андрусова, третий — в пределах северо-западного шельфа Черного моря, в области сочленения Восточно-Европейской платформы и крымского сегмента Скифской плиты.

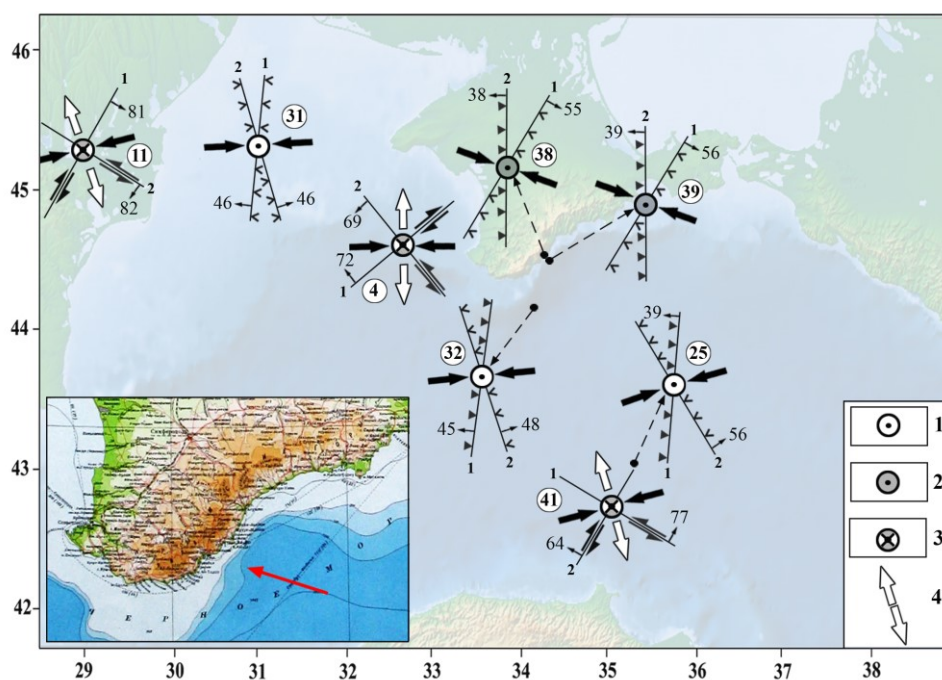


Рис. 7. Схема расположения очагов землетрясений взбросового типа, обусловленных обстановками субширотного сжатия, и сдвигового типа, возникновение которых равновероятно в обстановках субширотного сжатия и субмеридионального растяжения. Условные обозначения: 1 — взбросовые очаги в составе парагенезиса К2(1); 2 — то же самое, для К2(2); 3 — очаги сдвигового типа; 4 — направления растяжения. На врезке — локальный изгиб континентального склона (показан стрелкой). Остальные обозначения — см. на рис. 5.

Землетрясения, фокальные механизмы которых составляют парагенезис К2(2), являются приповерхностными и в энергетическом отношении уступают первым: при глубине 7 и 17 км их магнитуды варьируют в интервале $M_w=3.5-3.7$. Они компактно расположены в пределах Южнобережной сейсмогенной зоны и приурочены к локальному изгибу континентального склона, который на этом отрезке меняет простирание с северо-восточного на меридиональное или северо-западное (врезка на рис. 7). Это дает основание полагать, что фокальные механизмы парагенезиса К2(2), наряду с очагом №32 в составе К2(1), отражают процессы периодического надвигания юго-западной части Горного Крыма на центральный и восточный его сегменты по системе субмеридиональных нарушений, элементы залегания которых согласуются с параметрами нодальных плоскостей, имеющих наклон в западных румбах. На реалистичность подобного сценария указывает разница абсолютных отметок вершинных поверхностей Главной гряды Крымских гор, достигающих максимальных значений (до 1500 м и более) в пределах Бауган-яйлы и Никитской яйлы (к западу от изгиба континентального склона), против 1250 м — в расположенных восточнее

массивах Демерджи и Караби-яйла.

Квазимодель **К-2**, полученная путем осреднения параметров фокальных механизмов данного типа, представлена меридионально ориентированными нодальными плоскостями, идентифицируемыми как надвиг (*NP1*) и взброс (*NP2*) (рис. 6 в, табл. 4).

Наличие очагов взбросового типа, сформированных в условиях субширотного сжатия, является весьма значимым геодинамическим фактором еще и в том отношении, что во многих тектонических и геодинамических моделях Крымско-Черноморского региона постулируется структурообразующая роль только субмеридионального или диагонального, в основном, юго-восточного сжатия [21, 22 и др.]. Однако квазимодель **К-2** и аппроксимируемые ею фокальные механизмы взбросового типа однозначно указывают на периодическое влияние обстановок субширотного сжатия на геодинамические процессы в регионе, в том числе — и на особенности сейсмогенного разрывообразования.

Следует добавить, что в обстановках субширотного сжатия могли формироваться и очаги сдвигового типа с широтно ориентированной осью *P* (рис. 6 з). Однако их возникновение равновероятно как при субширотном сжатии, так и в условиях субмеридионального растяжения. Поэтому характеристики сдвиговых очагов и образуемых ими структурно-кинематических парагенезисов, а также их роль в современной геодинамике региона рассматриваются ниже отдельно.

Отметим еще одно значимое обстоятельство: в обеих ортогонально ориентированных системах (субмеридионального и субширотного сжатия) все очаги формировались исключительно под воздействием *первичных* полей напряжений, характеризуясь взбросовым деформационным режимом (табл. 4). Фокальные механизмы, свидетельствующие о существенных трансформациях первичного поля с усложнением деформационного режима сейсмогенеза, в регионе не идентифицированы. В то же время, как будет показано ниже, в обстановках, обусловленных воздействием диагонально ориентированных систем напряжений, трансформации первичного поля имели место, реализуясь в очагах взбросо-сдвигового типа, подчас не уступающих в количественном отношении взбросовым.

Обстановки юго-восточного–северо-западного сжатия идентифицированы в 9-ти фокальных механизмах регионального каталога, четыре из которых (включая композитный механизм №7*, полученный путем усреднения параметров нескольких слабых землетрясений Южнобережной зоны) относятся к взбросовому типу, а пять характеризуются взбросо-сдвиговым режимом (табл. 1, 4). Данная выборка является относительно «энергонасыщенной», поскольку значения магнитуд включенных в ее состав очагов не ниже $M_w=4$, а три из них даже имеют $M_w>5$. Исключение составляет композитный механизм №7*, аппроксимирующий параметры слабых (с $M_w\leq 2.5$) землетрясений.

По результатам сопоставления фокальных механизмов, характеризуемых разными деформационными режимами, все очаги сгруппированы в три структурно-кинематических парагенезиса (один взбросовый, два взбросо-сдвиговых), которые отражают сложные соотношения проявлений первичного и трансформированных полей напряжений (табл. 4, рис. 8).

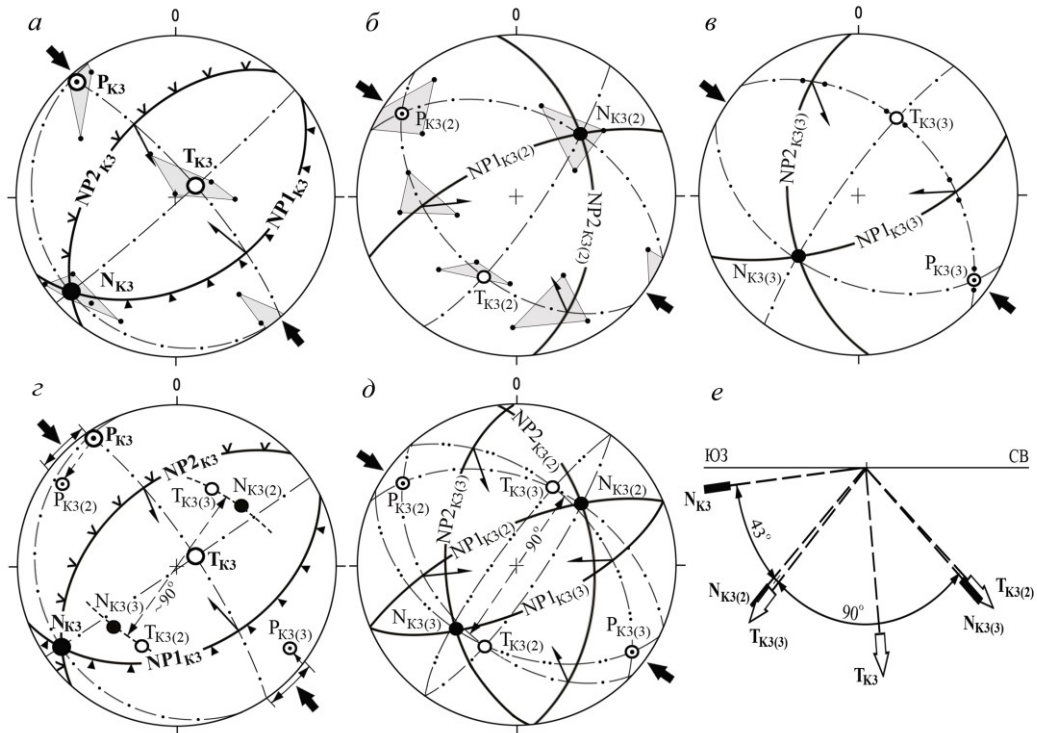


Рис. 8. Проявления сейсмогенеза в обстановках юго-восточного–северо-западного сжатия: *a* — парагенезис КЗ(1) взбросового типа, принятый в качестве квазимодели **К-3**; *б, в* — парагенезисы КЗ(2) и КЗ(3) взбросо-сдвигового типа, обусловленные трансформированными полями напряжений; *г* — соотношение параметров квазимодели **К-3** и парагенезисов КЗ(2), КЗ(3); *д, е* — соотношение параметров КЗ(2) и КЗ(3) на стереограмме (*д*) и на разрезе (*е*), ориентированном перпендикулярно направлению сжатия (пунктиром и стрелками показаны проекции осей на линию разреза). Условные обозначения — см. на рис. 4.

Основу парагенезиса КЗ(1) составляют 4 фокальных механизма взбросового типа (№№ 2, 7*, 9, 46). Учитывая высокие уровни магнитуд 2-х из этих землетрясений (№2 с $M_w=5.8$ и №46 с $M_w=5.1$, расхождение значений очаговых параметров которых не превышает 10°), можно полагать, что данный парагенезис вполне адекватно отражает особенности сейсмогенеза в условиях данной кинематической обстановки. Параметры 2-х остальных, наиболее слабых в энергетическом отношении взбросовых очагов (№9 с $M_w=4.2$ и №7* с $M_w \leq 2.5$) в составе данного парагенезиса, либо отражают более существенные флуктуации первичного поля, либо являются следствием значительных допусков в решениях их фокальных механизмов.

Поскольку остальные пять очагов, обусловленных юго-восточным–северо-западным сжатием, характеризуются взбросо-сдвиговым режимом, указывая на существенную степень трансформации поля напряжений, параметры парагенезиса КЗ(1) приняты в качестве квазимодели **К-3** первичного поля. Она представлена

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

нодальными плоскостями северо-восточного простирания с углами падения $(46 \pm 2)^\circ$ и тензором напряжений, две оси которого (P и N) горизонтальны и ориентированы, соответственно, в северо-западном и юго-западном направлениях, а ось минимального сжатия T является практически вертикальной (рис. 8 *а*, табл. 4).

Очаги взбросо-сдвигового типа, сформировавшиеся в обстановках юго-восточного–северо-западного сжатия, по особенностям распределения значений основных параметров их фокальных механизмов группируются в два парагенезиса:

- КЗ(2), включающий очаги №№3, 22, 26 (рис. 8 *б*) с магнитудами M_w от 4.5 до 5.6;

- КЗ(3), которому отвечают фокальные механизмы очагов №№12, 23 (рис. 8 *в*) с магнитудами $M_w=4.3$ и $M_w=4.0$, соответственно.

Сравнение этих парагенезисов путем вынесения их на одну стереограмму показывает, что они являются симметричными антиподами, развернутыми вокруг направления действия оси P относительно друг друга на $\approx 90^\circ$ таким образом, что оси T и N в тензорах вторичных полей практически поменялись местами (рис. 8 *г*, *д*). Весьма наглядно это иллюстрирует разрез, ориентированный перпендикулярно к оси P (рис. 8 *е*): здесь проекция оси минимального сжатия T одного парагенезиса с точностью до 2° совпадает с проекцией промежуточной оси N другого и наоборот. При этом ось T взбросового парагенезиса КЗ(1), который принят в качестве квазимодели первичного поля **К-3**, располагается примерно посередине между осями T и N парагенезисов КЗ(2) и КЗ(3), обусловленных трансформированными полями напряжений.

Землетрясения, возникшие в обстановках юго-восточного–северо-западного сжатия, локализованы в разных сегментах региона: от Кавказского побережья (в районе Туапсинской впадины) до глубоководной Западно-Черноморской впадины (рис. 9).

При этом в пределах Южнобережной сейсмогенной зоны установлены очаги всех трех парагенезисов. Последнее обстоятельство значимо в геодинамическом отношении. Несмотря на то, что направление сжатия в данном случае способствует формированию поддвига Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров, прямые признаки такового в проявлениях сейсмогенеза отсутствуют, поскольку, например, форшоки и афтершоки землетрясения №22 образуют компактную, отчетливо трассируемую полосу, погружающуюся в южных румбах — в сторону моря. Но если в качестве сейсмогенных разрывов в очаге №22, равно как и в расположенных неподалеку очагах №12 и 23, реализовались плоскости $NP2$, то особенности современной геодинамики можно объяснить активизацией субмеридиональных взбросо-сдвигов. В этом случае допустимо сопоставление параметров субмеридионально ориентированных разрывов в парагенезисах, сформированных в обстановках субширотного и юго-восточного–северо-западного сжатия. Оно отражает разные типы современной активизации зон меридиональных тектонических нарушений, формирующих морфологические особенности континентального склона. В обстановках субширотного сжатия они проявляются как надвиги и взбросы, по которым происходит надвигание юго-западной части Горного Крыма на центральный и восточный его сегменты (очаги №№ 32, 38 и 39 в составе квазимодели **К-2** — рис. 6).

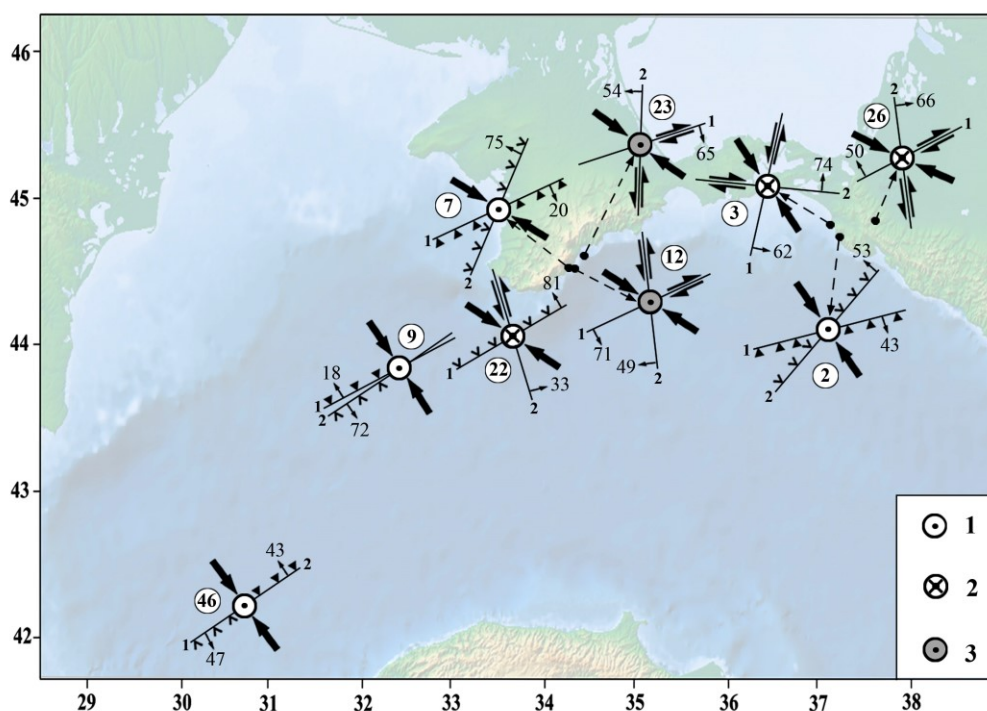


Рис. 9. Схема расположения очагов землетрясений, обусловленных обстановками юго-восточного–северо-западного сжатия. Условные обозначения: 1 — взбросовые очаги в составе парагенезиса КЗ(1); 2, 3 — то же самое, для КЗ(2) и КЗ(3) взбросо-сдвигового типа. Остальные обозначения — см. на рис. 5.

В условиях юго-восточного–северо-западного сжатия субмеридиональные системы разрывов активизируются в виде наклонных взбросо-сдвигов, вдоль которых осуществляется смещение восточной части Горного Крыма относительно западной по левому сдвигу с некоторой взбросовой составляющей (рис. 8 б, в). В пользу такого геодинамического сценария свидетельствует компактное расположение вышеперечисленных очагов в пределах Южнобережной зоны и приуроченность их к локальному изгибу континентального склона, который на этом отрезке резко меняет направление с северо-восточного на меридиональное (врезка на рис. 7, рис. 9).

Обстановки юго-западного–северо-восточного сжатия в регионе проявились относительно слабо. Они идентифицированы только в 3-х очагах, сформированных в условиях взбросового (№10, 49 в табл. 1) и взбросо-сдвигового (№20) деформационных режимов. В данной обстановке было реализовано одно из 2-х землетрясений с магнитудой $M_w=5.8$ (№10), максимальной для сейсмогенеза регионального сжатия. Взбросовые очаги локализованы в Туапсинской впадине у берегов Кавказа, взбросо-сдвиговый — в центре Южнобережной сейсмогенной зоны (рис.10).

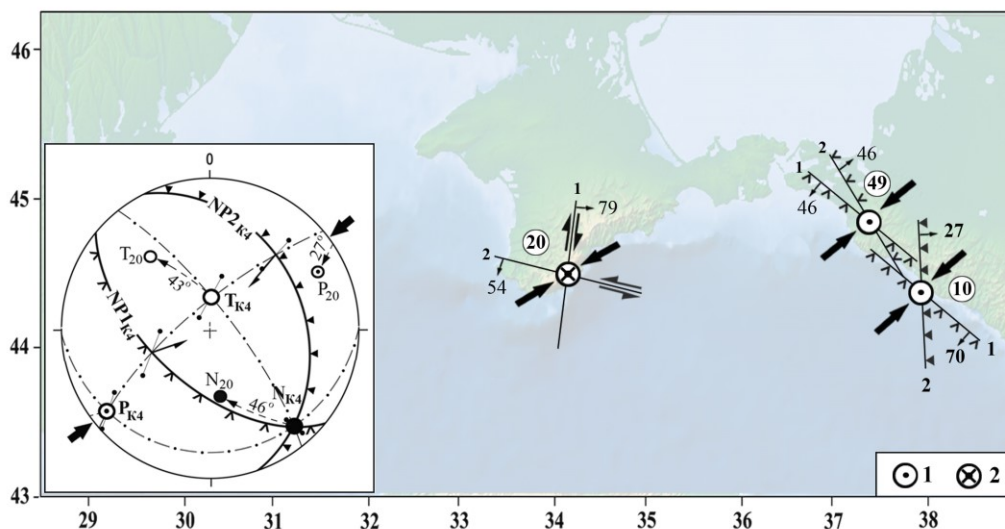


Рис. 10. Схема расположения очагов, сформировавшихся в обстановке юго-западного–северо-восточного сжатия; на врезке — квазимодель сейсмогенеза **К-4** (элементы с индексами К4) и положение осей главных напряжений для фокального механизма №20 (с индексами 20). *Условные обозначения:* 1 — очаги в составе квазимодели **К-4**, сформировавшиеся в первичном поле напряжений; 2 — очаг №20 взбросо-сдвигового типа, отражающего трансформацию первичного поля. Остальные обозначения — см. на рис. 4, 5.

Очаги взбросового типа, имеющие близкие значения основных параметров фокальных механизмов и с ориентировкой осей сжатия P в направлении $(233 \pm 4)^\circ$, отнесены к одному парагенезису, который характеризует параметры тензора напряжений основного (взбросового, нетрансформированного) поля для данной обстановки, будучи принятым в качестве квазимодели **К-4** (врезка на рис. 10). В контексте вышесказанного, параметры фокального механизма очага землетрясения №20 (более низкого энергетического уровня, $M_w=3.2$), произошедшего в пределах материковой части Крыма, отражают локальную трансформацию взбросового режима во взбросо-сдвиговый путем разворота тензора напряжений вокруг оси P на угол $\approx 45^\circ$.

4. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК РАСТЯЖЕНИЯ

Кинематические обстановки растяжения идентифицированы в 19-ти очагах землетрясений, рассредоточенных практически в пределах всего региона. Решения механизмов 11-ти из них относятся к сбросовому типу, 3-х — к сбросо-сдвиговому. Остальные пять очагов характеризуются сдвиго-сбросовым деформационным режимом, отражающим обстановки растяжения, поскольку их нодальные плоскости в структурно-кинематическом отношении являются сбросами и сдвиго-сбросами.

Обстановки субмеридионального растяжения в Крымско-Черноморском регионе представлены 6-ю очагами, четыре из которых (№№24, 27, 28 и 51) характеризуются сбросовым деформационным режимом, и два (№№36, 48) — сбросо-сдвиговым (табл. 1, 4). В энергетическом отношении это относительно слабые землетрясения с $M_w=3.4-4.4$, два из которых локализованы в пределах Южнобережной зоны, четыре (в том числе, оба очага сбросо-сдвигового типа) — в Туапсинской впадине (рис. 11).

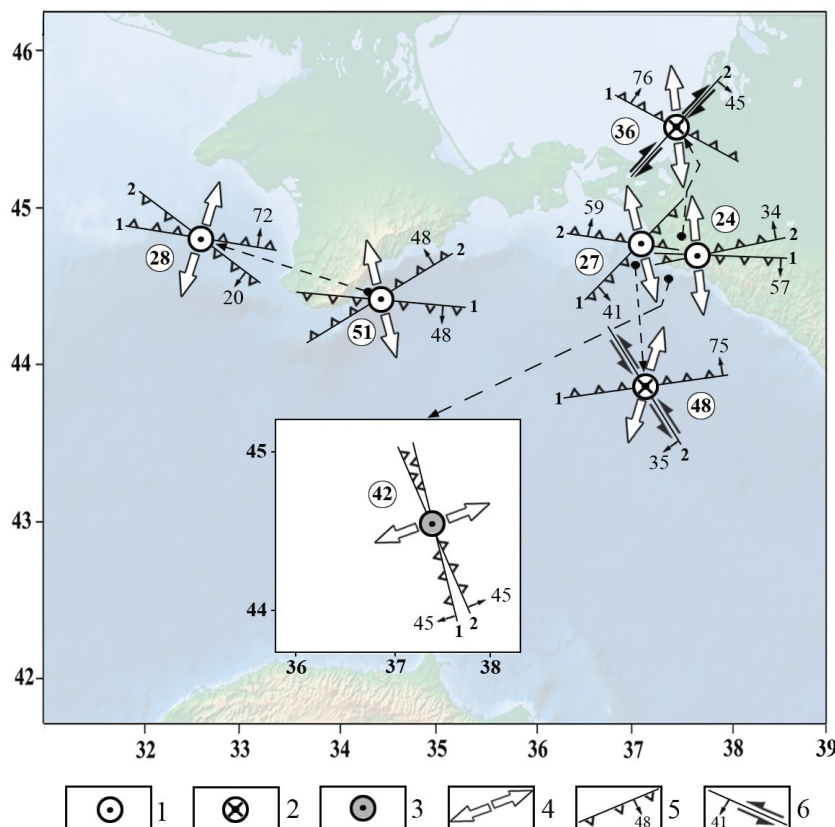


Рис. 11. Схема расположения очагов, обусловленных обстановками субмеридионального и субширотного (на врезке) растяжения. Условные обозначения: 1 — очаги сбросового типа в составе парагенезиса К5(1), принятого в качестве квазимодели К-5 субмеридионального растяжения; 2 — очаги сбросо-сдвигового типа в составе парагенезиса К5(2) субмеридионального растяжения; 3 — очаг субширотного растяжения (на врезке); 4 — направления растяжения; 5, 6 — проекции нодальных плоскостей на горизонтальную поверхность, их номера, углы падения и структурно-кинематические характеристики (5 — сбросы, 6 — сдвиги, сбросо-сдвиги и направления перемещения вдоль них); бергштрихи — со стороны падения плоскости.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Ориентировки осей тензора напряжений, обусловившего субмеридиональное растяжение, аппроксимированы структурно-кинематическим парагенезисом К5(1), который получен путем усреднения значений параметров всех фокальных механизмов сбросового типа (рис. 12 *а*). Поскольку оси T и N в нем имеют незначительные углы наклона (соответственно 8° и 2°), а нодальные плоскости падают практически строго на север и на юг, парагенезис отвечает «идеальному» сбросовому деформационному режиму и позволяет его рассматривать в качестве основы квазимодели **К-5** (табл. 4) для данной кинематической обстановки в целом.

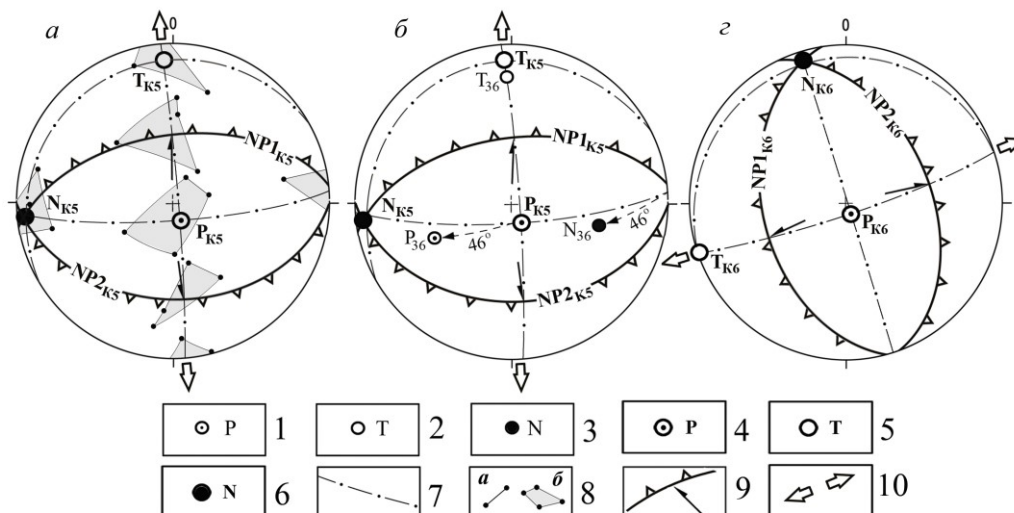


Рис. 12. Квазимодели сейсмогенеза субмеридионального и субширотного растяжения: *а* – парагенезис К5(1) сбросового типа, принятый в качестве квазимодели **К-5**; *б* – соотношение параметров квазимодели **К-5** и очага №36 сбросо-сдвигового типа (стрелки — угол разворота тензора первичного поля вокруг оси T); *в* – квазимодель **К-6** обстановок субширотного растяжения. Условные обозначения: 1–3 — проекции осей напряжений для парагенезисов и отдельных очагов (1 — сжатия, 2 — растяжения, 3 — промежуточной); 4–6 — то же самое, для квазимodelей; 7 — проекции плоскостей размещения осей напряжений; 8 — разброс значений одноименных параметров в парагенезисах и квазимodelях, аппроксимирующих данные 2-х (*а*) и более (*б*) фокальных механизмов; 9 — проекции нодальных плоскостей, идентифицируемых как сбросы (бергштрихи — со стороны падения плоскости, стрелки — направления перемещения висячего крыла); 10 — направления растяжения.

В фокальных механизмах землетрясений сбросо-сдвигового типа (№№36, 48) ось T также ориентирована субмеридионально, но расхождение значений остальных параметров этих очагов по отношению к квазимодели **К-5** отражает трансформацию

тензора напряжений первичного поля путем его разворота вокруг оси T в разные стороны: в первом случае величина отклонения составляет $45\text{--}46^\circ$ (рис. 12 б), во втором – около 30° . Подобный, но более отчетливо выраженный характер трансформаций первичного поля путем вращения тензора напряжений, описан выше – для парагенезисов $K3(2)$ и $K3(3)$, являющихся симметричными антиподами относительно направления оси P (рис. 8 з, д)

Обстановки субширотного растяжения в регионе представлены только одним относительно слабым ($M_w=3.8$) землетрясением сбросового типа (№42 в табл. 1), которое произошло в пределах Туапсинской впадины (рис. 11, врезка). Поскольку иные очаги этого типа в регионе не установлены, этот фокальный механизм рассматривается нами в качестве квазимоделю соответствующей кинематической обстановки — **К-6** (табл. 4, рис. 12 в).

В обстановках юго-восточного–северо-западного растяжения было сформировано три землетрясения сбросового типа (№№ 1, 37, 40), в том числе самое сильное в Крыму за последние 100 лет разрушительное Ялтинское землетрясение 11.09.1927 г. с магнитудой $M_w=6.9$ (№1 в табл.1). В эту же выборку включены один сбросо-сдвиговый фокальный механизм (№43), а также два композитных (№№6*,8*), полученных путем обобщения параметров однотипных очагов слабых землетрясений с $M_w\approx 2.5$. Последние характеризуются сдвиго-сбросовым режимом. На возникновение их в условиях растяжения указывают величины углов наклона оси T (34°) и структурно-кинематическая идентификация нодальных плоскостей в качестве сброса ($NP2$) и сдвиго-сброса ($NP2$). Почти все землетрясения данной выборки локализованы в пределах Южнобережной сейсмогенной зоны; лишь один очаг (№37) расположен на северо-восточном центриклинальном замыкании Туапсинской впадины (рис. 13).

Основные особенности обстановок юго-восточного–северо-западного растяжения отражает структурно-кинематический парагенезис $K7(1)$, полученный путем осреднения значений параметров фокальных механизмов сбросового типа. Он отвечает «идеальному» сбросовому режиму и, соответственно, принят в качестве квазимоделю **К-7** для сейсмогенеза, обусловленного воздействием первичных полей напряжений в данной кинематической обстановке (врезка на рис. 13). Учитывая морфологию континентального склона к югу от Крымского полуострова и общий характер распределения сейсмичности в пределах этого сегмента земной коры, в качестве реального сейсмогенного разрыва в квазимоделю **К-7** рассматривается нодальная плоскость $NP1$, идентифицируемая как сброс, падающий в юго-восточном направлении ($124/58^\circ$).

Остальные три фокальных механизма отражают особенности трансформаций первичного сбросового поля напряжений. Так, соотношение проекций нодальных плоскостей и осей главных напряжений квазимоделю **К-7** с параметрами механизмов очагов №№6*,8* таково, что оси P и T квазимоделю практически попадают на проекции нодальных плоскостей этих очагов и наоборот (рис. 14 а).

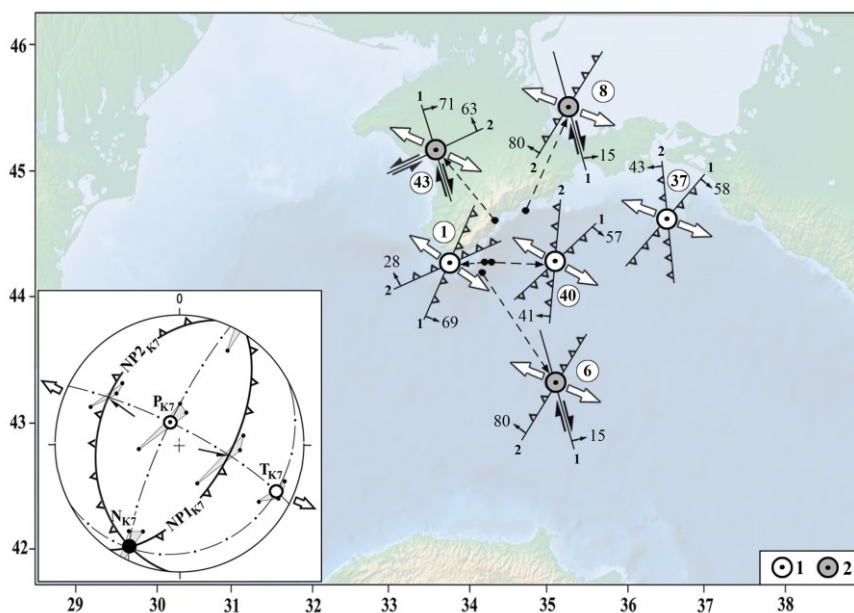


Рис. 13. Квазимодель **К-7** сбросового типа, аппроксимирующая обстановки юго-восточного–северо-западного растяжения (на врезке) и схема расположения очагов землетрясений, сформированных в данной обстановке. Условные обозначения: 1 — очаги сбросового типа в составе квазимодели **К-7**; 2 — очаги сбросо-сдвигового и сдвиго-сбросового типов, обусловленных трансформированными полями напряжений. Остальные обозначения — см. на рис. 11, 12.

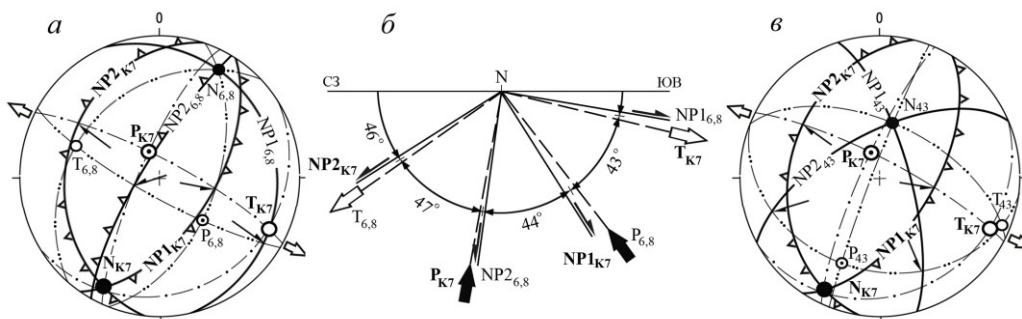


Рис. 14. Соотношение параметров квазимодели **К-7** и решений механизмов очагов, обусловленных трансформированными полями напряжений: **а, б** — для квазимодели **К-7** и очагов №№6*, 8* на стереограмме (**а**) и на разрезе (**б**), ориентированном перпендикулярно оси *N*, вокруг которой происходит разворот тензора напряжений (показаны проекции нодальных плоскостей, направления смещений по ним и проекции главных осей); **в** — для квазимодели **К-7** и очага №43. Условные обозначения — см. на рис. 12.

В то же время, результаты сопоставления параметров сбросовой квазимодели **К-7** и очага №43 сбросо-сдвигового типа показывают, что в данном случае оси P и N почти меняются местами, отражая трансформацию первичного поля путем разворота тензора напряжений вокруг оси растяжения T на $68\div 70^\circ$ (рис. 14 *в*).

Обстановки юго-западно-северо-восточного растяжения обусловили возникновение очагов с разными деформационными режимами — сбросовым (№№16, 34, 50) и сдвиго-сбросовым (№№5, 17 и 18). При этом очаги сбросового типа локализованы только в пределах Южнобережной сейсмогенной зоны (рис. 15).

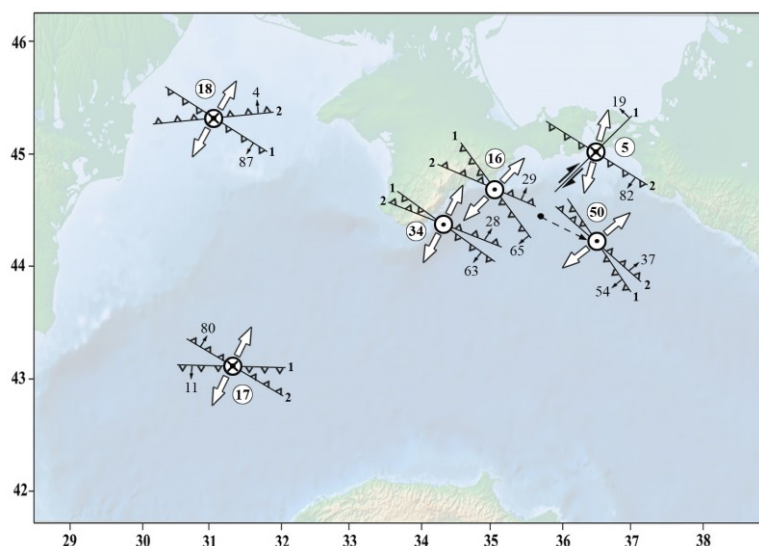


Рис. 15. Распределение сбросовых (точки в кружках) и сдвиго-сбросовых (кресты в кружках) очагов землетрясений, обусловленных обстановками юго-западно-северо-восточного растяжения. Условные обозначения — см. на рис. 11.

Они имеют сходные значения параметров фокальных механизмов (с отклонением от среднего не более, чем на 12°), что позволяет отнести их к одному структурно-кинематическому парагенезису К8(1). Его нодальные плоскости идентифицированы как падающие в противоположных направлениях сбросы северо-западного простираения почти без сдвиговой составляющей, а ось растяжения под небольшим углом ориентирована в юго-западном-северо-восточном направлении. Учитывая, что парагенезис К8(1) включает очаг с максимальной магнитудой (№16, $M_w=4.9$) и отвечает «идеальному» сбросовому режиму, он отождествлен с квазимоделью сейсмогенеза **К-8**, характеризуемой строго диагональным ($220^\circ \leftrightarrow 40^\circ$) направлением растяжения и отражающей, таким образом, особенности первичного поля для данной кинематической обстановки (табл. 4, рис. 16 *а*).

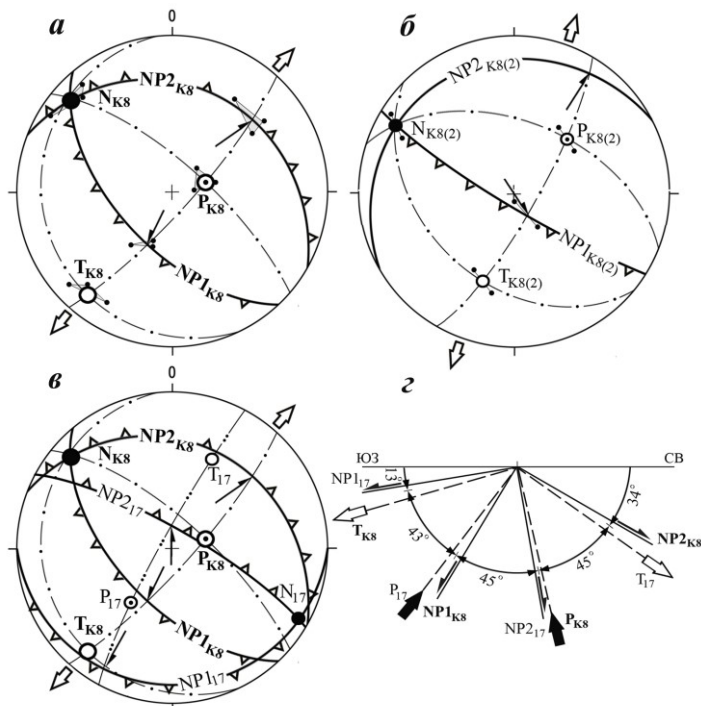


Рис. 16. Проявления сейсмогенеза в обстановках юго-западно–северо-восточного растяжения: *а* — парагенезис К8(1) взбросового типа, принятый в качестве квазимодели **К-8**; *б* — парагенезис К8(2) взбросо-сдвигового типа; *в*, *з* — соотношение на стереограмме (*в*) и в разрезе (*з*) параметров квазимодели **К-8** и очага №17 сдвига-сбросового типа. Условные обозначения — см. на рис. 12.

Землетрясения, характеризуемые сдвиго-сбросовым режимом, рассредоточены на всей изучаемой территории: очаг №18 локализован в пределах северо-западного шельфа Черного моря в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты, №5 — в зоне Керченско-Таманского прогиба, №17 — в пределах Западно-Черноморской впадины (рис. 15). При этом два очага (№№5, 18) имеют весьма близкие значения соответствующих параметров с отклонениями от среднего на $3\div 9^\circ$, что позволяет объединить их в один парагенезис К8(2) сдвиго-сбросового типа (рис. 16 *б*). Учитывая близость значений параметров К8(1) и К8(2), указывающую на незначительную степень трансформации первичного поля напряжений, обстановки юго-западно–северо-восточного растяжения можно было бы охарактеризовать одной стереограммой, аппроксимирующей значения параметров всех фокальных механизмов, за исключением очага №17. Однако рассматривать эту стереограмму в качестве квазимодели **К-8** не позволяет условие, которое априори предполагает отдельный анализ фокальных механизмов, обусловленных влиянием первичных и трансформированных полей напряжений.

Параметры фокального механизма №17 существенно отличаются от параметров остальных очагов, сформировавшихся в данной кинематической обстановке. Тем не менее, есть основания рассматривать его не как случайное проявление, а в качестве системного элемента регионального сейсмогенеза, отражающего особенности трансформаций первичных полей напряжений. Так, сопоставление значений параметров квазимодели **К-8** и очага №17 показывает, что в последнем случае происходило изменение положения тензора напряжений путем его разворота вокруг оси N , вследствие чего проекции главных осей P и T одной системы напряжений почти совпадают с проекциями нодальных плоскостей другой, и наоборот (рис. 16 в). На разрезе, ориентированном перпендикулярно к направлению промежуточной оси N (рис. 16 з), они локализованы в створе узких $(6\pm 2)^\circ$ секторов, угол между которыми составляет $(45\pm 2)^\circ$. Следовательно, в результате трансформации первичного поля квазимодели **К-8** плоскостям локализации осей нормальных напряжений PN и TN стали соответствовать плоскости действия максимальных касательных напряжений в очаге №17.

Следует отметить и симметричное соотношение значений параметров тензоров трансформированных (сдвиго-сбросового типа) систем напряжений в парагенезисе $K8(2)$ и в очаге №17, в которых, вследствие вращения тензора вокруг оси N на величину $(90\pm 8)^\circ$, положение оси максимального растяжения T почти совпадает с положением оси минимального растяжения P (рис. 16 б, в).

5. ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК СУБМЕРИДИОНАЛЬНОГО РАСТЯЖЕНИЯ – СУБШИРОТНОГО СЖАТИЯ

Двойственный характер определения этой категории кинематических обстановок обусловлен тем обстоятельством, что формирование очагов землетрясений сдвигового типа с широтно ориентированной осью P и субмеридиональной осью T равновероятно как в условиях субширотного сжатия, так и субмеридионального растяжения. В первом случае оси P и T характеризуют направления действия, соответственно, максимального и минимального сжимающих напряжений, во втором – минимального и максимального растяжения. Ввиду статистически непредставительной выборки данных по региону, какие-либо признаки или способы, позволяющие прямым образом установить, какая из этих обстановок являлась структурообразующей, отсутствуют. Пространственная приуроченность очагов сдвигового типа к разным геоструктурам земной коры региона (рис. 7) также не позволяет использовать (даже в качестве не прямых, косвенных признаков) какие-либо геодинамические критерии для идентификации обстановок их формирования.

В Крымско-Черноморском регионе идентифицировано только 3 очага сдвигового типа с широтно ориентированной осью P и, соответственно, меридионально направленной осью T (№№4, 11, 41 в табл. 1). Учитывая близость значений параметров фокальных механизмов, они объединены в квазимодель **К-9** (табл. 4, рис. 6 з), которая аппроксимирует обстановки субмеридионального растяжения–субширотного сжатия в регионе. Основу квазимодели составляют

диагонально ориентированные вертикальные нодальные плоскости, в структурно-кинематическом отношении идентифицируемые как сдвиги практически без какой-либо взбросовой или сбросовой составляющей.

Сдвиговые землетрясения приурочены к зонам крупных тектонических нарушений региона северо-западного простирания [1]. Это позволяет рассматривать в качестве реальных разрывов в этих очагах нодальные плоскости, которые имеют аналогичное простирание, указывая на современную активизацию зон этих разломов по левому сдвигу, равновероятную как при субмеридиональном растяжении, так и в обстановках субширотного сжатия.

6. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Вариативный характер кинематических обстановок сейсмогенеза и многообразие деформационных режимов в очагах землетрясений Крымско-Черноморского региона обуславливают возможность анализа этих факторов на предмет выявления закономерностей их проявления по следующим аспектам:

- распределение ориентировок осей главных напряжений, обусловивших обстановки сжатия и растяжения;
- трансформации первичных полей напряжений во вторичные;
- иерархические взаимоотношения разноориентированных первичных полей напряжений.

Секторальное распределение ориентировок осей главных напряжений, обусловивших обстановки сжатия и растяжения. Эта закономерность в процессе сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона выражена не столь явственно, как в пределах ранее изученных сейсмоактивных областей [6], вследствие недостаточной репрезентативности данных и относительно невысоких магнитуд землетрясений, для которых получены решения механизмов очагов. Тем не менее результаты последовательных преобразований (от выделения структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений, удовлетворяющих одному полю напряжений, до построения квазимodelей, аппроксимирующих кинематические обстановки и деформационные режимы сейсмогенеза) и анализа параметров фокальных механизмов также указывают на избирательность ориентировок осей главных полей напряжений по отношению к сторонам света. В той или иной мере она проявляется как в условиях регионального сжатия (рис. 17 *a*), так и в обстановках растяжения (рис. 17 *б*), позволяя обособить относительно узкие ($8\div 19^\circ$) общие сектора преимущественного действия главных напряжений сжатия и растяжения субмеридиональной, субширотной и диагональных ориентировок (рис. 17 *в*). Эта избирательность присуща квазимodelям сейсмогенеза основных (сдвигового, сбросового, взбросового) типов, а также результирующим построениям, учитывающим наличие локальных трансформаций поля напряжений.

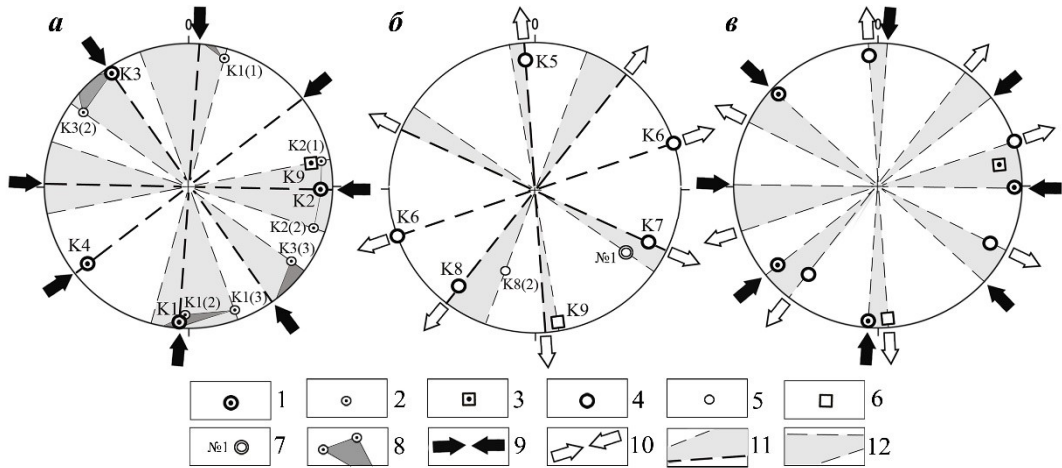


Рис. 17. Секторальное распределение ориентировок осей напряжений в квази моделях и структурно-кинематических парагенезисах: *а* — осей *P* для обстановок сжатия; *б* — осей *T* для обстановок растяжения; *в* — сводная (границы секторов максимального сжатия-растяжения). Условные обозначения: 1–3 — проекции осей *P* в квази моделях (1), парагенезисах (2) взбросового типа и в квази модели сдвигового типа (3); 4–6 — проекции осей *T* в квази моделях (4), парагенезисах (5) сбросового типа и в квази модели сдвигового типа (6); 7 — проекция оси *T* в фокальном механизме №1 землетрясения 11.09.1927 г.; 8 — разброс значений оси *P* в парагенезисах одной кинематической обстановки; 9–0 — направления сжатия (9) и растяжения (10); 11 — секторы сжатия и растяжения: жирный пунктир – направление действия осей *P* и *T* в квази моделях соответствующих обстановок (на рис. *а* и *б*); 12 — секторы максимального сжатия-растяжения, обобщенные для всех кинематических обстановок региона (на рис. *в*).

Полученные данные согласуются не только с особенностями распределения ориентировок осей главных напряжений в проявлениях сейсмогенеза других сегментов Средиземноморского пояса [6, 11, 12], но и с результатами анализа структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений, характеризующих процессы новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма [23].

Особенности трансформаций первичных полей напряжений. Выше отмечалось, что усложнение основных (взбросового, сбросового и сдвигового) деформационных режимов сейсмогенеза в виде их «комбинаторных» проявлений – сдвига-сбросового, взбросо- и сбросо-сдвигового типов, являются следствием локальных трансформаций первичных полей напряжений. Причиной этих трансформаций является изменение соотношения величин напряжений (выполнить количественную оценку которых по имеющимся данным не представляется

возможным), определяющих характер тензора напряжений и действующих в разных направлениях.

При анализе кинематических обстановок отмечались некоторые соотношения параметров фокальных механизмов и их парагенезисов, отвечающих первичным и трансформированным полям напряжений. Специфический характер этих соотношений позволяет выполнить обобщение особенностей трансформаций напряжений первичного поля для тех обстановок, где эти трансформации имели место, поскольку в условиях некоторых ортогонально ориентированных систем напряжений (субмеридионального и субширотного сжатия, субширотного сжатия–субмеридионального растяжения) таковые не проявились.

Установлено, что во всех случаях трансформации происходят, главным образом, путем вращения тензора напряжений вокруг направления действия одной из главных осей с изменением положения двух других осей. Приведенные ниже примеры (рис. 18), по-видимому, не исчерпывают всех теоретически возможных вариантов подобных превращений. Тем не менее, они в достаточной мере отражают основные особенности трансформаций первичных полей напряжений.

Так, в обстановках сжатия в обоих диагональных направлениях отмечается вращение тензора напряжений вокруг направления оси сжатия. При этом в первом случае, отражающем соотношение параметров квазимодели **К-3** и структурно-кинематических парагенезисов взбросо-сдвигового типа **К3(2)** и **К3(3)**, при трансформации происходит разворот тензора напряжений относительно направления оси *P* в противоположные стороны на величину, близкую 45° (рис. 8 *z*, *d*, рис. 18 *a*). В то же время, смещение положения осей *T* и *N* парагенезисов **К3(2)** и **К3(3)** относительно друг друга составляет $\approx 90^\circ$, вследствие чего эти оси меняются местами. Во втором случае, в обстановке юго-западного–северо-восточного сжатия (рис. 18 *b*), положения осей *T* и *N* фокального механизма очага №20 взбросо-сдвигового типа смещаются по отношению к соответствующим параметрам первичного поля квазимодели **К-4** на величину, также близкую 45° ($43^\circ \div 46^\circ$).

В условиях субмеридионального растяжения трансформированным полям напряжений соответствуют фокальные механизмы сбросо-сдвигового типа №№36 и 48. Трансформация тензора напряжений первичного поля (аппроксимируемого квазимоделью **К-5**) происходит путем его разворота вокруг оси *T* в разные стороны, при этом в первом случае (№36) величина отклонения оси *P* от первичного положения составляет 46° , во втором (№48) — 32° (рис. 18 *в*).

Более сложные и многообразные виды трансформаций проявились в кинематических обстановках диагонального растяжения. Это обусловлено как значительным количеством землетрясений, фокальные механизмы которых характеризуются «комбинаторными» режимами (сбросо-сдвигового и сдвиго-сбросового типов), так и вариативностью параметров последних.

При анализе сейсмогенеза, обусловленного обстановками юго-восточного–северо-западного растяжения, было показано, что в одном случае (при сопоставлении первичного поля квазимодели **К-7** с параметрами фокальных механизмов №№6*, 8* сдвиго-сбросового типа) трансформация происходила путем разворота тензора напряжений вокруг оси *N* на величину, равную $(46 \pm 2)^\circ$, вследствие чего проекции

осей P и T очагов №№6*, 8* практически оказались наложенными на проекции нодальных плоскостей квазимоделей **К-7** (рис. 14 *а, б*, рис. 18 *з*). Во втором случае, в процессе реализации очага №43 сбросо-сдвигового типа, трансформация первичного поля осуществлялась уже путем разворота тензора напряжений вокруг оси растяжения T на $68\div 70^\circ$ таким образом, что оси P и N почти поменялись местами (рис. 14 *в*, рис. 18 *д*).

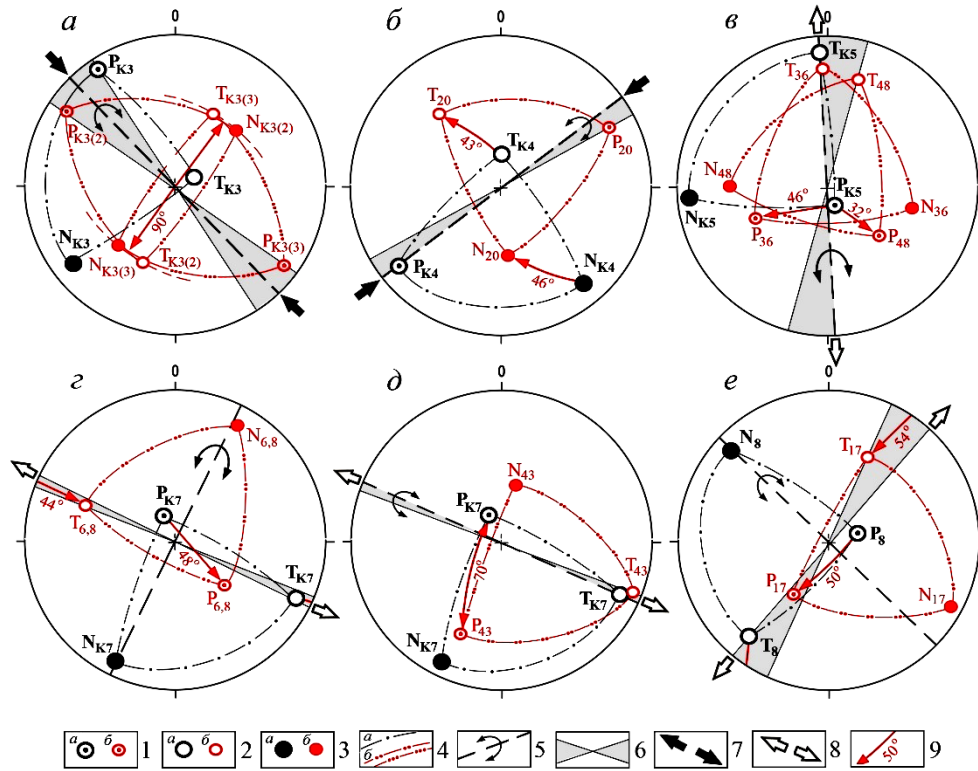


Рис. 18. Отражение трансформаций тензоров напряжений в параметрах парагенезисов и очагов в обстановках: *а* — юго-восточного-северо-западного сжатия; *б* — юго-западного-северо-восточного сжатия; *в* — субмеридионального растяжения; *з, д* — юго-восточного-северо-западного растяжения; *е* — юго-западного-северо-восточного растяжения. Условные обозначения: 1 — проекции осей P для квазимоделей (*а*), парагенезисов и очагов (*б*); 2 — то же самое — для осей T ; 3 — то же самое — для осей N ; 4 — проекции плоскостей размещения осей главных напряжений для квазимоделей (*а*), парагенезисов и очагов (*б*); 5 — ось вращения тензора напряжений; 6 — секторы сжатия-растяжения; 7, 8 — направления сжатия (7) и растяжения (8); 9 — угловая величина разворота тензора напряжений. Подстрочные индексы — наименования осей главных напряжений в квазимоделях (черное), в парагенезисах и очагах (красное) соответствующих обстановок.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

Трансформации первичного сейсмогенерирующего поля в обстановке юго-западного–северо-восточного растяжения нашли отражение:

- в незначительных изменениях, которые устанавливаются в результате сопоставления квази модели **К-8** и структурно-кинематического парагенезиса К8(2), аппроксимирующего параметры фокальных механизмов №№5 и 18 сдвиго-сбросового типа (рис. 16 *a, б*);

- в существенном развороте тензора напряжений очага №17 сдвиго-сбросового типа по отношению к первичному полю вокруг промежуточной оси *N*; при этом отклонение осей *P* и *T* в очаге №17 от первоначального положения одноименных осей составило $50 \pm 54^\circ$, а в проекции на плоскость разреза (рис. 18 *e*, рис. 16 *z*) – $(45 \pm 3)^\circ$, в результате чего они практически оказались наложенными на проекции нодальных плоскостей квази модели **К-8** и наоборот (рис. 16 *в*).

В общем виде особенности трансформаций сейсмогенерирующих полей напряжений можно представить стереограммой, на которой приведены величины отклонений 2-х главных осей от направления третьей оси (независимо от их названия), вокруг которой происходит вращение тензора напряжений (рис. 19).

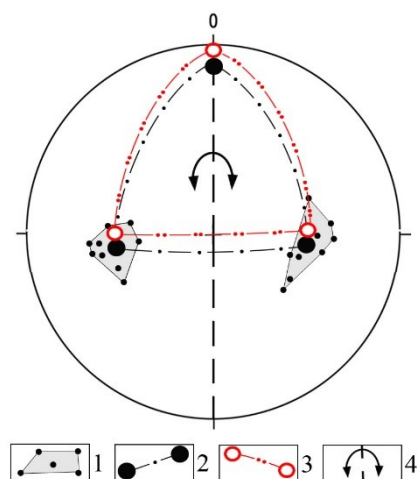


Рис. 19. Стереодиаграмма распределения отклонений 2-х главных осей от направления третьей оси, вокруг которой происходит вращение тензора напряжений в процессе трансформации первичного поля. *Условные обозначения:* 1 — области отклонений 2-х главных осей от направления третьей (независимо от их названия); 2 — проекции осей и плоскостей их размещения в «реальной» модели тензора напряжений трансформированных полей; 3 — то же самое для «идеальной» модели; 4 — ось вращения тензора напряжений.

Среднее по совокупностям этих отклонений с каждой из сторон от оси вращения составляет 44° и 46° , то есть $(45 \pm 1)^\circ$, что позволяет обосновать модель тензора напряжений для трансформированных полей с учетом реальных отклонений проекций 2-х осей от третьей, являющейся осью вращения, независимо от названия

последней. Как видно из стереограммы, построенная («реальная») модель отличается от «идеальной», в которой ось вращения принята строго горизонтальной, лишь небольшим углом наклона этой оси.

Приведенные на рисунке 19 особенности трансформаций первичных систем напряжений дополняют высказанное в работах [1, 6] положение о «поясном» характере распределения главных осей в процессе сейсмогенеза. Согласно этому положению, первый круговой пояс, протягивающийся вдоль внешней границы стереограммы, образуют концентрации главных осей напряжений, обусловленные проявлениями основных деформационных режимов. Второй пояс (в полосе стереограммы $35\div 55^\circ$, в среднем — 45°) отражает распределение главных осей в тензорах трансформированных полей.

Добавим, что в случаях, когда в процессе трансформации вращение тензора напряжений происходит вокруг оси N , проекции осей P и T трансформированных систем, отклоняясь от своего первоначального положения на величину $\approx 45^\circ$, накладываются на нодальные плоскости квазимodelей первичных полей (рис. 14 *а*, рис. 16 *в*), указывая на то, что плоскости максимальных касательных и нормальных напряжений меняются местами. По-видимому, в природных геосистемах, подверженных релаксации и/или трансформации, такой механизм дискретного изменения полей напряжений является наименее энергозатратным.

Иерархические взаимоотношения разноориентированных полей напряжений. Выше указывалось, что количественные соотношения проявлений регионального (в пределах исследуемой территории, табл. 2) и надрегионального (в Средиземноморском поясе, рис. 3) сейсмогенеза послужили критерием для разделения деформационных режимов (и, соответственно, структурообразующих систем напряжений) на основные (первичные) и трансформированные. Дополнительным подтверждением этого на региональном материале являются:

- различие энергетических уровней землетрясений, сформировавшихся в условиях одних и тех же кинематических обстановок, но характеризующихся разными деформационными режимами, поскольку предельные значения магнитуд M_{\max} в очагах основных (сдвигового, взбросового и сбросового) типов как правило выше, чем для остальных типов сейсмогенеза, реализовавшихся в аналогичных кинематических обстановках (рис. 20 *а*);
- количественное преобладание землетрясений, обусловленных воздействием первичных полей напряжений (рис. 20 *б*);
- отсутствие очагов с деформационными режимами, не относящимися к категории первичных, в некоторых обстановках: субмеридионального и субширотного сжатия, субширотного сжатия – субмеридионального растяжения (рис. 20 *а, б*).

В работе [1] было отмечено некоторое различие в углах наклона осей сжатия и растяжения в квазимodelях сейсмогенеза, характеризующих разные кинематические обстановки, а именно: в условиях диагонального сжатия и растяжения величины этих углов несколько больше, чем в ортогонально ориентированных системах. С учетом новых данных по решениям механизмов очагов, эта тенденция сохранилась, хотя различие и стало менее контрастным (рис. 21).

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

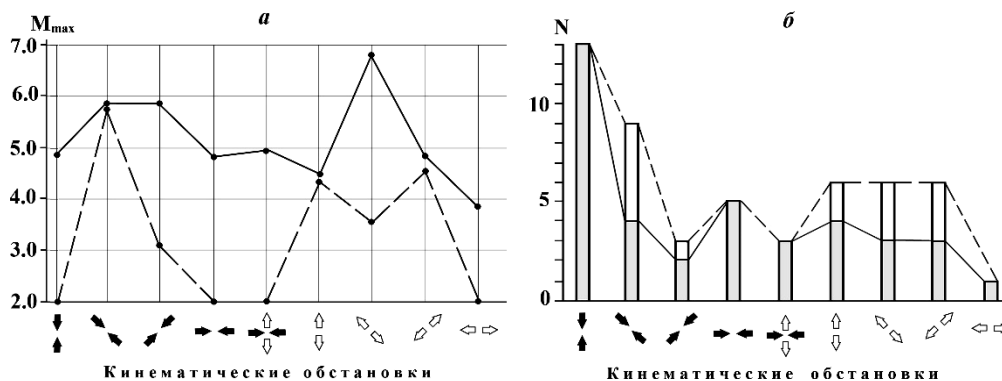


Рис. 20. Предельные значения магнитуд M_{max} землетрясений, сформировавшихся в условиях основных (сплошная) и трансформированных (пунктир) полей напряжений (а) и соотношения количества землетрясений (N), обусловленных воздействием первичных (залитые столбцы) и трансформированных (незалитые фрагменты) полей (б) в условиях разных кинематических обстановок.

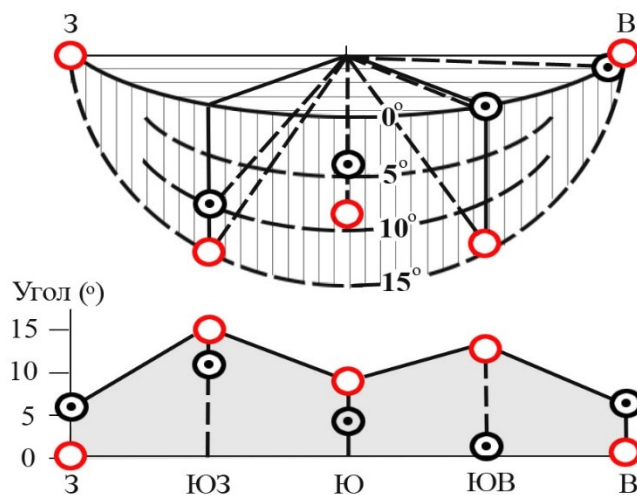


Рис. 21. Углы наклона осей главных напряжений первичного поля (черные кружки с точкой — оси P в квазимоделях сжатия; красные кружки — оси T в квазимоделях растяжения; залитое серым на графике — область предельных значений углов наклона).

Таким образом, получил подтверждение тезис о том, что поля напряжений ортогонального (меридионального и широтного) сжатия-растяжения относятся к системам более высокого иерархического уровня по сравнению с таковыми диагональной ориентировки, поскольку последние характеризуются более значительными отклонениями главных осей напряжений от горизонтального положения. Аналогичная закономерность просматривается и в распределении

ориентировок осей сжатия в моделях сейсмогенеза других исследуемых сегментов Средиземноморского пояса [6].

ВЫВОДЫ

Основные выводы данной работы касаются, главным образом, методологических аспектов выполненных исследований, что обусловлено специфическими особенностями используемого фактического материала. К таковым относятся:

- перманентное (по мере получения новых данных) пополнение регионального каталога фокальных механизмов, которое, во-первых, обуславливает необходимость учета этих данных при тектонофизическом анализе сейсмогенеза и, во-вторых, позволяет верифицировать (или, наоборот, опровергнуть) ранее полученные выводы и подтвердить (или подвергнуть сомнению) корректность методических подходов, применяемых в процессе исследований;

- недостаточная в статистическом отношении, несмотря на постоянное пополнение базы данных, представительность анализируемого материала (решений механизмов очагов) для такого сложного в геологическом отношении региона как Черное море и прилегающие территории.

В контексте сказанного, результаты анализа кинематических обстановок сейсмогенеза в Крымско-Черноморском регионе, выполненного на основе пополненного каталога (с учетом всех имеющихся данных по решениям механизмов очагов), позволяют обосновать следующие выводы:

1. Основные особенности сейсмогенного разрывообразования в регионе, установленные ранее [1], получили свое подтверждение в результате привлечения и анализа новых данных. Эти особенности вполне согласуются с закономерностями, установленными в процессе изучения сейсмогенеза в пределах отдельных областей Средиземноморского пояса – Загроса, Вранча и Кавказа [6]. Так, в достаточной мере обоснован избирательный характер проявления сейсмогенерирующих полей напряжений, который выражается в секторальном распределении ориентировок осей P и T в квазимоделях разных типов сейсмогенеза. Также в ходе сопоставительного анализа квазимоделей, отражающих воздействие первичных полей напряжений, и всех проявлений (структурно-кинематических парагенезисов, отдельных фокальных механизмов), обусловленных влиянием вторичных (трансформированных) систем, дополнительно получено модельное обоснование «поясного» распределения ориентировок главных осей как следствия закономерных изменений напряженно-деформированного состояния земной коры в процессе трансформаций полей напряжений. Ряд факторов (высокие энергетические уровни и количественное преобладание землетрясений, обусловленных первичными полями напряжений, отсутствие в некоторых обстановках очагов с деформационными режимами, не относящимися к категории первичных) подтверждают положение о том, что напряжения ортогонального сжатия и растяжения относятся к системам более высокого иерархического уровня по сравнению с таковыми диагональной ориентировки.

2. На фоне современной геодинамической нестабильности Крымско-Черноморского региона, выраженной многообразием быстро сменяющихся кинематических обстановок и деформационных режимов, установлены новые факторы, позволяющие соотнести параметры фокальных механизмов с некоторыми особенностями геологического строения изучаемой территории. Так, отмечается пространственная приуроченность очагов Южнобережной сейсмогенной зоны, обусловленных обстановками субширотного и юго-восточного–северо-западного сжатия, к области локального изгиба континентального склона, где происходит изменение его простирания с северо-восточного на меридиональное или северо-западное. Структурно-кинематические характеристики нодальных плоскостей, идентифицируемых как взбросы, указывают на возможность тектонической активизации разломов меридиональной ориентировки, по которым в обстановках субширотного сжатия происходит надвигание юго-западной части Горного Крыма на центральный и восточный его сегменты. В условиях юго-восточного–северо-западного сжатия эти же системы разрывов могут активизироваться в виде взбросо-сдвигов, вдоль которых осуществляется смещение восточной части Горного Крыма относительно западной по левому сдвигу.

В то же время, многообразие кинематических обстановок, идентифицированных в очагах Южнобережной сейсмогенной зоны, по-прежнему не позволяет обосновать принадлежность этой зоны или отдельных ее фрагментов к какому-либо одному типу сейсмогенеза. При этом и в пространственных параметрах, и в структурно-кинематических характеристиках нодальных плоскостей фокальных механизмов Южнобережной зоны отсутствуют сколько-нибудь значимые прямые признаки современных перемещений Восточно-Черноморской плиты по типу поддвига под Крымский полуостров.

3. Несмотря на статистически относительно малопредставительную региональную базу данных по решениям механизмов очагов землетрясений, системный характер полученных результатов и их воспроизводимость свидетельствуют о корректности применяемого методического подхода. Периодически возобновляемый (по мере получения новых данных) тектонофизический анализ кинематических обстановок сейсмогенеза и в дальнейшем предполагает выполнение ряда последовательных преобразований (от выделения структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений до построения квазимodelей) с вовлечением в обработку всех фокальных механизмов, включая очаги малых энергетических уровней.

Список литературы

1. Вольфман Ю. М., Пустовитенко Б. Г., Колесникова Е. Я. Обстановки сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Т. 4 (70). №4. С. 206–250.
2. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Скорректированные очаговые параметры землетрясений Крыма 2018–2019 гг. // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. 2021. Том 7 (73). №4. С. 164–175.
3. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Спектральные и очаговые параметры землетрясений

- Крымско-Черноморского региона // Землетрясения Северной Евразии в 2014 г. 2020, вып. 23(2014 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН. 2020. С. 250–262.
4. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2015 г. // Землетрясения Северной Евразии. 2021. Вып. 24 (2015 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2021. С. 226–236.
 5. Пустовитенко Б. Г. (отв. сост.) Каталог механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016–2017 гг. // Землетрясения Северной Евразии. 2022. Вып. 25 (2016–2017 г.). Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, Приложение на CD_ROM.
 6. Вольфман Ю. М., Колесникова Е. Я., Пустовитенко Б. Г., Милуков В. К. Избирательный характер проявления сейсмогенерирующих полей напряжений в пределах Средиземноморского пояса (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Вулканология и сейсмология, 2017. №6. С. 64–79.
 7. Введенская А. В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
 8. Балакина Л. М., Введенская А. В., Голубева И. В., Мишарина Л. А. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 192 с.
 9. Мишарина Л. А. Исследование механизма очагов слабых землетрясений северо-восточного сектора Байкальского рифта // Труды III Всесоюзного симпозиума. Новосибирск. 1969. С. 147–165.
 10. Юнга С. Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. М.: Наука, 1990. 190 с.
 11. Вольфман Ю. М. Структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных зон системы Загроса (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Геофизический журнал, 2013. Т. 35, №2. С. 38–64.
 12. Вольфман Ю. М., Гинтов О. Б., Колесникова Е. Я., Муровская А. В. Тектонофизическая интерпретация механизмов очагов землетрясений системы Загрос // Геодинамика и тектонофизика. 2014. 5(1). С. 305–319.
 13. Гущенко О. И., Мострюков А. О., Петров В. А. Структура поля современного регионального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса // Докл. АН СССР. 1991. 312. №4. С. 830–835.
 14. Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: «Феникс», 2005. 572 с.
 15. Anderson E. M. The dynamics of faulting. Trans. Edinburgh, Geol. 1951. Sec (8), pp. 387–402.
 16. Гобаренко В. С., Муровская А. В., Егорова Т. П., Шермет Е. Е. Современные коллизионные процессы на северной окраине Черного моря // Геотектоника. 2016. №4. С. 68–87.
 17. Сайт Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC). Режим доступа: emsc-csem.org. (дата обращения 20.11.2019).
 18. Гущенко О. И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 26–51.
 19. Ребецкий Ю. Л., Сим Л. А., Маринин А. В. От зеркал скольжения к тектоническим напряжениям. Методики и алгоритмы. М.: ГЕОС, 2017. 234 с.
 20. Пустовитенко А. А., Пустовитенко Б. Г. Новые данные о процессах в очаге ощутимого землетрясения 2 июля 1990 года (Крым) // Доповіді Національної Академії Наук України. 2015. №2. С. 102–109.
 21. Борисенко Л. С., Плахотный Л. Г. Геодинамика Крымско-Черноморского региона как следствие многоуровневого тектогенеза // Сб. материалов конференции «Геодинамика Крымско-Черноморского региона». Симферополь: Ин-т геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет. 1997. С. 54–64.
 22. Юдин В. В. Геодинамика Крыма. Симферополь: Нац. академия природоохранного и курортного строительства, УкрГГРИ, ДИАЙПИ, 2011. 336 с.
 23. Вольфман Ю. М. Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма. 2 // Геофизический журнал. 2015. Т. 37. №1. С. 100–120.

NEW RESULTS OF THE TECTONOPHYSICAL ANALYSIS OF THE FOCAL
MECHANISMS OF EARTHQUAKES IN THE CRIMEAN-BLACK SEA REGION

Volfman Yu. M.¹, Pustovitenko B. G.², Kolesnikova E. Ya.³

^{1,3}*Institute of seismology and geodynamics, V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation*

²*Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities, Simferopol, Russian Federation*

E-mail: ¹seism.volf@gmail.com, ²bpustovitenko@mail.ru

The results of the study of kinematic conditions and deformation regimes of seismogenesis in the Crimean-Black Sea region are presented. The method of tectonophysical analysis of discontinuities and mixings in earthquake sources has been applied. All available solutions for earthquake source mechanisms in the region as of 2022 were used. Stereographic quasi-models of seismogenesis are constructed, which approximate the values of the parameters of focal mechanisms corresponding to different types of kinematic conditions. The main features of local transformations of seismogenic stress fields are established. Cases of possible reflection of the processes of seismogenic rupture* formation in the features of the geological structure and modern development of the Crimea and adjacent territories are considered.

Keywords: seismogenesis, stress fields, stress axes, earthquake focal mechanisms, kinematic settings, stress field transformations.

References

1. Volfman Yu. M., Pustovitenko B. G., Kolesnikova E. Ya. Obstanovki sejsmogeneza Krymsko-Chernomorskogo regiona (po dannym reshenij mekhanizmov ochagov zemletryasenij) (Environments of seismogenesis in the Crimean-Black Sea region (according to the solutions of earthquake source mechanisms)). *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2018, Vol. 4(70), no. 4, pp. 206–250 (in Russian).
2. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Skorrektilirovannye ochagovye parametry zemletryasenij Kryma 2018–2019 gg. (Adjusted source parameters of earthquakes in Crimea in 2018–2019). *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2021, Vol. 7(73), no. 4, pp. 164–175 (in Russian).
3. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (Spectral and source parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). *Zemletryaseniya Severnoj Evrazii v 2014 godu*. V. 23(2014). Obninsk: 2020, FIC EGS RAN, pp. 250–262 (in Russian).
4. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Ochagovye parametry zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona v 2015 (Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2015). *Zemletryaseniya Severnoj Evrazii v 2015 godu*. V. 24(2015). Obninsk: 2021, FIC EGS RAN, pp. 226–236 (in Russian).
5. Pustovitenko B. G. (otv. sost.) Katalog mekhanizmov ochagov zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona za 2016–2017 g. (Catalog of earthquake source mechanisms in the Crimean-Black Sea region for 2016–2017). *Zemletryaseniya Severnoj Evrazii*. V. 25(2016–2017). Obninsk: 2022, FIC EGS RAN, Application on SD-ROM (in Russian).
6. Volfman Yu. M., Kolesnikova E. Ya., Pustovitenko B. G., Milyukov V. K. Izbiratel'nyj karakter proyavleniya sejsmogeneriruyushchih polej napryazhenij v predelah Sredizemnomorskogo poyasa (po dannym reshenij mekhanizmov ochagov zemletryasenij) (Selective nature of the manifestation of seismogenic stress fields within the Mediterranean belt (according to the solutions of earthquake source mechanisms)). *Volcanology and seismology*, 2017, no. 6, pp. 64–79 (in Russian).

7. Vvedenskaya A. V. Issledovaniya napryazhenij i razryvov v ochagah zemletryasenij pri pomoshchi teorii dislokacij. (Investigation of stresses and discontinuities in earthquake sources using the theory of dislocations). Moscow: Nauka, 1969, 136 p. (in Russian).
8. Balakina L. M., Vvedenskaya A. V., Golubeva I. V., Misharina L. A. Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij. (The Earth's Elastic Stress Field and the Mechanism of Earthquake Foci). Moscow: Nauka, 1972, 192 p. (in Russian).
9. Misharina L. A. Issledovanie mekhanizma ochagov slabyh zemletryasenij severo-vostochnogo sektora Bajkal'skogo rifta (Investigation of the focal mechanism of weak earthquakes in the northeastern sector of the Baikal Rift). Trudy III Vsesoyuznogo simpoziuma. Novosibirsk. 1969, pp. 147–165 (in Russian).
10. Yunga S. L. Metody i rezul'taty izucheniya sejsmotektonicheskikh deformatsij (Methods and results of studying seismotectonic deformations). Moscow: Nauka, 1990, 190 p. (in Russian).
11. Vol'fman Yu. M. Strukturno-kinematicheskaya identifikaciya sejsmogennyh zon sistemy Zagrosa (po dannym reshenij mekhanizmov ochagov zemletryasenij) (Structural-kinematic identification of seismogenic zones of the Zagros system (according to the solutions of earthquake source mechanisms)). Geofizicheskij zhurnal. 2013, Vol. 35, no. 2, pp. 38–64 (in Russian).
12. Vol'fman Yu. M., Gintov O. B., Kolesnikova E. Ya., Murovskaya A. V. Tektonofizicheskaya interpretaciya mekhanizmov ochagov zemletryasenij sistemy Zagros (Tectonophysical interpretation of earthquake source mechanisms in the Zagros system). Geodinamika i tektonofizika. 2014, 5(1), pp. 305–319 (in Russian).
13. Gushchenko O. I., Mostryukov A. O., Petrov V. A. Struktura polya sovremennogo regional'nogo napryazheniya sejsmoaktivnyh zon zemnoj kory vostochnoj chasti Sredizemnomorskogo aktivnogo poyasa (Structure of the modern regional stress field of seismically active zones of the Earth's crust in the eastern part of the Mediterranean active belt). Doklady AN SSSR. 1991, 312, no. 4, pp. 830–835 (in Russian).
14. Gintov O. B. Polevaya tektonofizika i ee primenenie pri izuchenii deformatsij zemnoj kory Ukrainy (Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the earth's crust of Ukraine). Kiev: «Feniks», 2005, 572 p. (in Russian).
15. Anderson E. M. The dynamics of faulting. Trans. Edinburgh, Geol. 1951. Sec (8), pp. 387–402.
16. Gobarenko V. S., Murovskaya A. V., Egorova T. P., Sheremet E. E. Sovremennye kollizionnye processy na severnoj okraine Chernogo moray (Modern collisional processes on the northern margin of the Black Sea). Geotektonika. 2016, no. 4, pp. 68–87 (in Russian).
17. Sajt Evropejsko-Sredizemnomorskogo sejsmologicheskogo centra (EMSC). URL: emsc-csem.org. (data obrashcheniya 20.11.2019).
18. Gushchenko O. I. Rekonstrukciya polya megaregional'nyh tektonicheskikh napryazhenij sejsmoaktivnyh oblastej Evrazii. Polya napryazhenij i deformatsij v litosfere (Reconstruction of the field of megaregional tectonic stresses in seismically active regions of Eurasia. Stress and strain fields in the lithosphere). Moscow: Nauka, 1979, pp. 26–51 (in Russian).
19. Rebeckij Yu. L., Sim L. A., Marinin A. V. Ot zerkal skol'zheniya k tektonicheskim napryazheniyam. Metodiki i algoritmy (From slickensides to tectonic stresses. Methods and algorithms). Moscow: GEOS, 2017, 274 p. (in Russian).
20. Pustovitenko A. A., Pustovitenko B. G. Novye dannye o processah v ochage oshchutimogo zemletryaseniya 2 iyulya 1990 goda (Krym) (New data on the processes in the source of a perceptible earthquake on July 2, 1990 (Crimea)). Dopovidi Nacional'noj Akademii nauk Ukrainy. 2015, nn. 2, pp. 102–109 (in Russian).
21. Borisenko L. S., Plahotnyj L. G. Geodinamika Krymsko-Chernomorskogo regiona kak sledstvie mnogourovnenno go tektogeneza (Geodynamics of the Crimean-Black Sea region as a result of multilevel tectogenesis). Sbornik materialov konferencii «Geodinamika Krymsko-Chernomorskogo regiona». Simferopol': Institut geofiziki NANU, Krymskij ekspertnyj sovet. 1997, pp. 54–64 (in Russian).
22. Yudin V. V. Geodinamika Kryma (Geodynamics of Crimea). Simferopol': Nacional'nay akademiya prirodohrannogo i kurortnogo stroitel'stva, UkrGGRI, DIAJPI. 2011, 336 p. (in Russian).
23. Vol'fman Yu. M. Deformacionnye rezhimy i kinematicheskie ustanovki novejshego tektonicheskogo razryvoobrazovaniya v predelakh Gornogo Kryma. 2 (Deformation regimes and kinematic settings of the latest tectonic rupture formation within the Crimean Mountains. 2). Geofizicheskij zhurnal. 2015, Vol. 37, no. 1, pp. 100–120 (in Russian).

Поступила в редакцию 06.09.2022 г.