

УДК 550.348.435

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2024 ГОДА

Пустовитенко Б. Г.¹, Эреджепов Э. Э.², Бондарь М. Н.³

^{1,2,3}Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства, Симферополь, Российская Федерация.

³Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, Институт сейсмологии и геодинамики, Симферополь, Российская Федерация.

E-mail: ¹bpustovitenko@mail.ru

Представлены новые результаты изучения и анализа спектральных, кинематических, динамических и энергетических характеристик очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона по данным сейсмического мониторинга сетью станций Крыма в 2024 году. Кинематические очаговые параметры восстановлены для двух наиболее сильных землетрясений 17 января с $M_w = 3.8$ и 11 октября с $M_w = 4.9$ по данным решения фокального механизма в рамках дислокационной модели двойного диполя. Спектральные, динамические и энергетические параметры очагов (f_0 , M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma$, \bar{y} , E_u и M_w) изучены для 12 землетрясений по амплитудным спектрам объемных сейсмических волн с использованием теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}). Дается анализ полученных результатов.

Ключевые слова: механизм очага, амплитудный спектр, модель Бруна, спектральная плотность, угловая частота, динамические параметры очага, приведенная сейсмическая энергия.

ВВЕДЕНИЕ

Основные сейсмогенерирующие структуры зон возникновения очагов землетрясений (ВОЗ) Крымско-Черноморского региона, оказывающих наибольшие сейсмические воздействия на территорию Крыма, расположены в акватории Черного моря и не доступны прямым наблюдениям и исследованиям. В такой ситуации реконструкция и уточнение параметров зон ВОЗ и моделей очагов землетрясений, а также разработка геодинамических моделей литосферы возможны по экспериментальным данным решения обратной задачи сейсмологии: восстановления очаговых параметров по записям сейсмических волн на группе сейсмических станций. При этом важно получить представительную базу данных за длительный период наблюдений в широком энергетическом диапазоне сейсмических событий и постоянно ее дополнять новыми определениями. По результатам сейсмического мониторинга в 2024 году восстановлены очаговые параметры для 12 местных землетрясений в диапазоне энергетических классов $K_{II} = Lg(E_s) = 6.4–12.9$ по региональной классификации [1]. Задачей данной работы явилось представление и анализ полученных результатов изучения кинематических, спектральных, динамических и энергетических характеристик очагов землетрясений за 2024 год, отобранных для исследования.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для восстановления **кинематических** параметров очагов - решения фокального механизма наиболее сильных землетрясений региона 17 января с $K_{II} = 10.9$ и 11 октября с $K_{II} = 12.9$ использованы знаки первых вступлений продольных сейсмических волн-Р (сжатия и разрежения), зарегистрированные на группе

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2024 ГОДА

сейсмических станций, расположенных в широком азимутальном створе и в большом диапазоне эпицентральных расстояний. Для этого помимо данных по станциям Крыма и опубликованных в Международном сейсмологическом центре [2] для землетрясения 17 января с $K_{II} = 10.9$ дополнительно были определены знаки P — волн по сейсмограммам на станциях ближней зоны Крыма. В результате получена представительная выборка исходных данных (n) для надежного решения механизма очагов: 17 января — $n = 46$ и 11 октября — $n = 112$.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений изучены по 75 амплитудным спектрам продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных на пяти стационарных региональных сейсмических станциях Института сейсмологии и геодинамики КФУ (ИГС КФУ): «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), и двух автономных ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства» (ГАУ «КРЦ»): «Донузлав-2» (DNZ2) и «Опук» (OPUK).

Всего для оценки очаговых параметров местных землетрясений за 2024 год отобраны записи двенадцати сейсмических событий (табл. 1), представляющих научный интерес с позиции их пространственного расположения и энергетического уровня (рис. 1).

Таблица 1.
Основные параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2024 г., для которых определены очаговые параметры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда			Район
			φ°, N	λ°, E		M_w/n , табл. 3	ML_{wsg}	K_{II}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1*	17.01	07 34 02.5	43.92	33.44	36	4.0/8	3.9	10.9	Севастопольский (№ 1)
2	26.03	23 53 12.7	44.68	36.96	35	3.6/4	3.1	9.5	Керченско-Анапский (№ 5)
3	14.04	15 39 46.2	44.32	33.11	26	3.3/2	2.7	8.9	Севастопольский (№ 1)
4	21.05	19 49 40.0	43.85	35.05	25	2.7/1	2.4	8.3	Судакско-Феодосийский (№ 4)
5	30.05	20 50 42.2	45.66	33.25	41	2.2/1	1.5	6.4	Степной (№ 6)
6	19.06	07 57 23.5	43.98	33.55	10	3.2/4	2.8	8.7	Севастопольский (№ 1)
7	02.07	22 52 24.0	44.39	34.54	24	2.4/3	1.8	7.3	Алуштинский (№ 3)
8	13.07	03 22 20.0	44.52	36.57	7	3.0/1	2.4	8.1	Керченско-Анапский (№ 5)
9	01.09	02 50 57.9	44.68	36.56	10	3.2/10	3.1	9.8	Керченско-Анапский (№ 5)
10*	11.10	07 16 39.4	42.58	31.42	9	4.9/7	5.0	12.9	Черноморская впадина (№ 9)
11	28.10	15 31 49.0	44.54	34.44	15	2.5/3	2.0	7.5	Алуштинский (№ 3)
12	28.10	15 41 25.4	44.54	34.44	13	2.6/4	2.2	7.8	Алуштинский (№ 3)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–6, 8–10 даны по данным обработки в ИГС КФУ, значения M_w/n (графа 7)– из табл. 3, где n – число определений, участвовавших в осреднении; *– землетрясения, для которых получено решение механизма очага.

Большинство исследованных землетрясений произошло в акватории Черного моря (рис. 1), в основных сеймотектонических структурах Крымского региона на

глубинах от 7 км до 36 км в диапазоне эпицентральных расстояний $\Delta=16\div382$ км от сейсмических станций. Только одно относительно слабое событие с $K_{II}=6.4$ возникло в нижнем слое перехода кора-мантия ($h=41$ км) на Тарханкутском полуострове Крыма (район № 6, Степной Крым). Очаг самого сильного землетрясения 11 октября 2024 г. с $K_{II}=12.9$ приурочен к южной части Западной Черноморской впадины (район № 9) вблизи очаговой зоны землетрясения 15.10.2016 г. с $K_{II}=13.1$ [3]. Другое наиболее сильное землетрясение 17 января ($K_{II}=10.9$) произошло в узле пересечения двух сейсмолинеаментов 1-го порядка: Южнобережного и Одесско-Синопского [4].

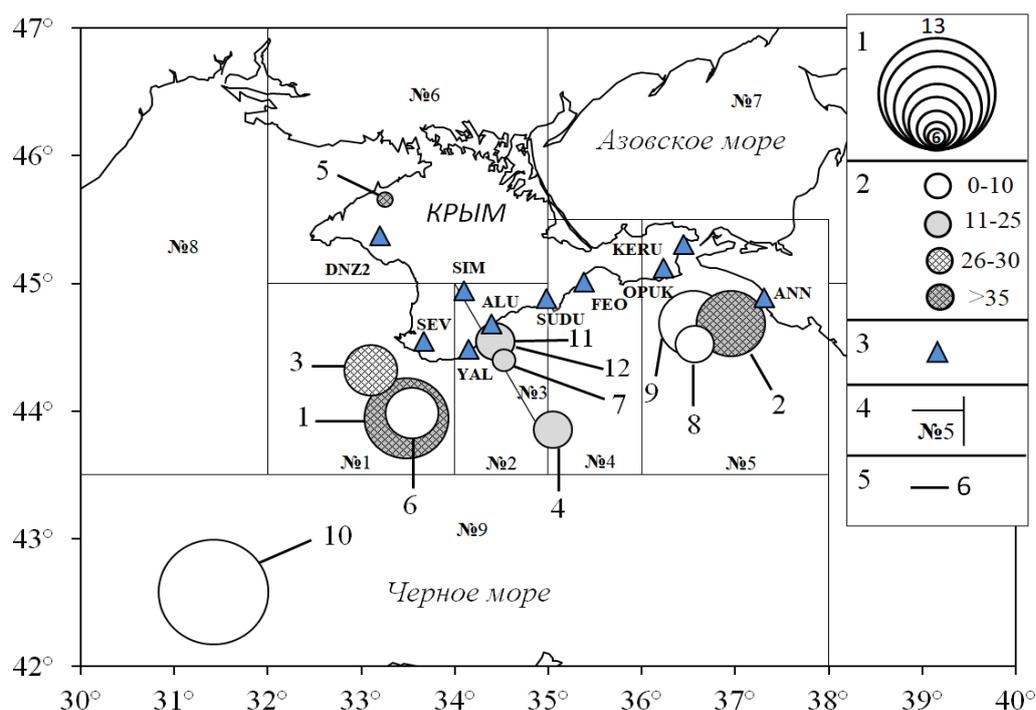


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2024 г., для которых восстановлены очаговые параметры: 1 — энергетический класс K_{II} [1]; 2 — глубина очага; 3 — сейсмические станции; 4 — граница сейсмоактивных районов; 5 — номера землетрясений по табл. 1.

Составлено авторами.

Для расчета амплитудных спектров выбраны стационарные сейсмограммы, отвечающие критериям высокого качества с четкими моментами вступления объемных волн и амплитудами колебаний, в несколько раз превышающими фон помех. Пример использованных в работе сейсмограмм дан на рисунке 2.

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2024 ГОДА

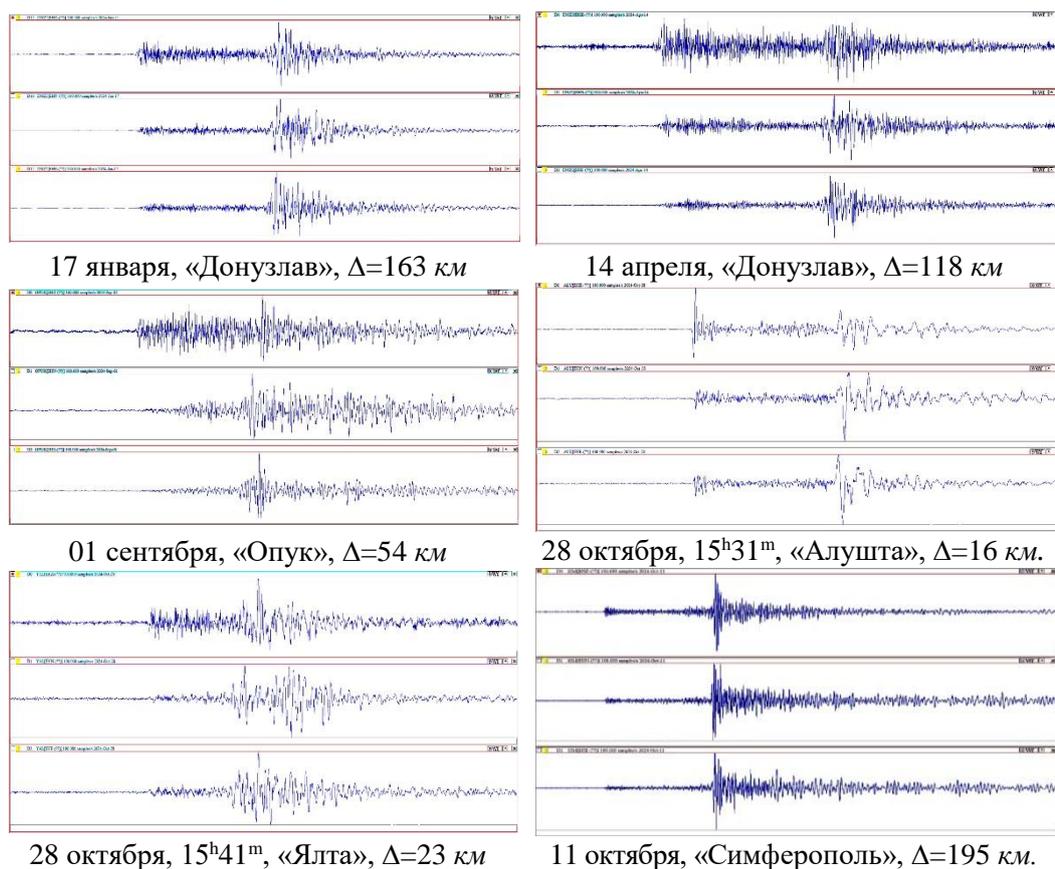


Рис. 2. Примеры записей землетрясений 2024 г. на сейсмических станциях Крыма. Составлено авторами.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Для решения механизма очагов использована методика, описанная в работе [5], разработанная из теоретического представления дислокационной модели очага сдвиговым источником в виде двойного диполя [6]. Углы выхода сейсмических волн из очага на сейсмические станции регистрации рассчитывались исходя из глубины гипоцентра и удаленности станций регистрации: для близких станций по региональному годографу [7], а для удаленных — по таблицам из работы [8].

Для анализа землетрясения 11 октября также привлечены решения фокального механизма по методу тензора сейсмического момента (ТСМ), полученные в разных сейсмологических агентствах и опубликованных в [2].

Интерпретация амплитудных спектров и оценка динамических параметров очагов выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [9].

Амплитудные спектры поперечных волн (S) рассчитывались отдельно по записям двух горизонтальных составляющих записи (N-S) и (E-W), а продольных (P)

— по вертикальной компоненте (Z). Длительность времени τ участка записи для расчета амплитудного спектра, выбиралась от момента вступлений P - и S - волн до спада их максимальных амплитуд A_{\max} на уровень $1/3 A_{\max}$ [10].

Примеры амплитудных спектров объемных волн и их аппроксимация в рамках теоретической модели ω^{-2} даны на рис. 3.

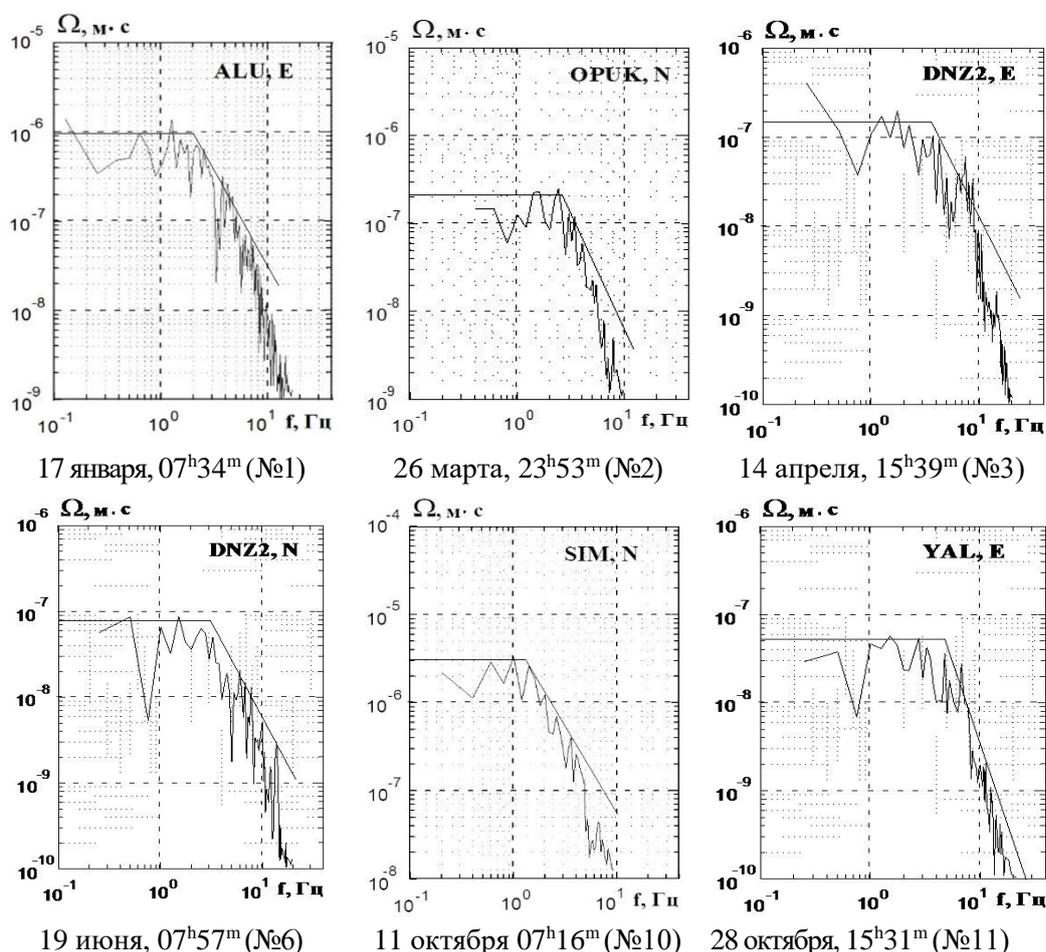


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма 2024 г. и их аппроксимация (прямые линии) в рамках теоретической модели ω^{-2} .

Составлено авторами.

Как видно из рис. 3 амплитудные спектры землетрясений 2024 года уверенно аппроксимированы параметрами теоретической модели (ω^{-2}): спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ при $f \rightarrow 0$, угловой частотой f_0 (ω_0) и углом наклона $\gamma \sim -2$, в соответствие с которой спектральная плотность Ω_0 пропорциональна скалярному

сейсмическому моменту M_0 , а угловая частота f_0 прямо связана с размером радиуса круговой дислокации r_0 :

$$M_0 = \Omega_0 (4\pi\rho \cdot V^3) / R_{0\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega) \cdot Sm(f)$$

$$r_0 = 2.34 \frac{V_p}{2\pi f_0}$$

где V — скорость распространения объемной волны; ρ — плотность пород в окрестности очага, $G(\Delta, h)$ — поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ — частотная характеристика среды под станцией регистрации, $Sm(f)$ — поправка за неупругое затухание в мантии, $R_{0\phi}$ — направленность излучения из очага на станцию регистрации.

Параметры моделей глубинной среды в очаговой зоне землетрясения и на пути распространения сейсмических волн очаг-станция регистрации подбирались в соответствие с пространственным расположением его гипоцентра. Поправка $R_{0\phi}$ — для землетрясений 17 января и 11 октября рассчитана из параметров механизма очагов по табл. 2, а для слабых толчков, когда невозможно решить фокальный механизм, принято среднее $R_{0\phi} = 0.4$ [10]. Для вычисления поправки $Sm(f)$ использованы данные о добротности среды Q региона [11,12].

По найденным значениям сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 рассчитаны другие динамические и энергетические параметры очагов: средние величины напряжений в очаге (сброшенное $\Delta\sigma$ и кажущееся $\eta\sigma$), $\Delta\sigma_r$ — радиационное трение, ε — деформация сдвига в окрестности очага, \bar{u} — средняя подвижка по разрыву, E_U — энергия образования дислокации в очаге, моментная магнитуда M_w по формулам из работ [13, 14, 15, 16], которые приведены в [17].

Дополнительно также проведена оценка доли полной очаговой энергии, затраченной на деформацию среды в очаговых зонах землетрясений (M_0), которая перешла в сейсмические колебания ($E_s=10^{K_n}$) и израсходована на дислокацию в очаге (E_U), т.е. приведенной сейсмической и дислокационной энергии e и d по соотношениям:

$$e = E_s / M_0 \cdot 10^{13},$$

$$d = E_U \cdot 10^8 / M_0 \cdot 10^{13}$$

где $E_s=10^{K_n}$ в Дж, M_0 в Н·м

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Кинематические параметры очагов землетрясений. Результаты решения механизмов очагов в рамках двойного диполя (double Couple) и методом тензора сейсмического момента (ТСМ) приведены в таблице 2, а их стереограммы, представленные в нижней полусфере — на рис. 4.

Землетрясение 17 января произошло в обстановке растягивающих напряжений близмеридионального направления. Тип подвижки в очаге — вертикальный сброс ($DP=81^\circ$) вдоль нодальной плоскости $NP1$ широтного простирания ($STK=275^\circ$). Другая плоскость $NP2$ ориентирована диагонально ($STK=145^\circ$) с пологим падением к юго-западу ($DP=14^\circ$).

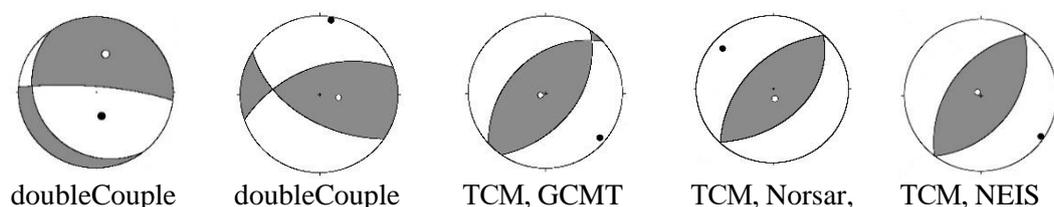
Таблица 2.

Параметры механизма очагов землетрясений Крыма в 2024 г.

Дата г м д	t_0 , ч мин с	h , км	M_w	Оси главных напряжений						Нодальные плоскости					
				T		N		P		$NP1$			$NP2$		
				PL	AZM	PL	AZM	PL	AZM	STK	DP	$SLIP$	STK	DP	$SLIP$
2024.01.17	07 34 02.5	36	4.0	35	14	10	276	53	172	275	81	-101	145	14	-41
2024.10.11	07 16 39.4	9	4.9	60	98	30	278	0	8	252	52	51	125	52	129
2024.10.11 ¹	07 16 44.9	17	5.0	83	242	6	39	3	130	34	48	82	226	43	99
2024.10.11 ²	07 16 39.4	10	4.8	85	142	1	40	5	310	39	40	88	221	50	91
2024.10.11 ³	07 16 49.5	11	4.8	89	318	0	215	1	125	35	46	90	215	44	90

Примечание: индексы ¹⁻³ — решения тензора сейсмического момента (TCM) центраида, по данным сейсмологических агентств [2]: 1— GCMТ, 2— Norsar, 3— NEIS, соответственно.

Составлено авторами.



17.01.2024

11.10.2024

Рис. 4. Диаграммы механизма очагов землетрясений по данным P -волн (doubleCouple) и тензора сейсмического момента (TCM), соответственно.

Составлено авторами.

Землетрясение 11 октября возникло под действием горизонтальных сил сжатия меридиональной ориентации (север-юг) со взбросо-сдвиговым типом подвижки в очаге по равновероятным наклонным ($DP=52^\circ$) плоскостям разрыва близдиагонального направления ($STK=252^\circ$ и 125°). Решения фокального механизма очага этого землетрясения, выполненные также по методу тензора сейсмического момента (TCM) центраида в трех агентствах [2] (табл. 3, рис. 4), близки между собой и представлены также взбросовым типом подвижки в очаге, как и полученным нами в рамках doubleCouple по знакам первых вступлений продольных волн (рис. 4). Напомним, что в рамках двойного диполя определяется механизм начала вспарывания, а по TCM — процесса максимального разрушения в очаговой зоне.

Несмотря на однотипность поля напряжений, под действием которого возникло землетрясение и происходило дальнейшее вспарывание разрыва, их фокальные механизмы имели отличительные особенности. Так, если в момент возникновения землетрясения в очаге произошел взбросо-сдвиг с преобладанием взброса над сдвигом (косой взброс с правосторонней компонентой смещения), то в момент максимального разрушения среды — чистый взброс с изменением направления первичного меридионального поля сжимающих напряжений на диагональное.

Эти изменения могут быть связаны как с возможными допустимыми погрешностями в решениях фокального механизма разными методами с различным набором исходных данных, так и с реальной трансформацией полей напряжений в процессе сложного процесса вспарывания разрывов в неоднородной геологической среде. Второе предположение более правдоподобно, поскольку метод ТСМ по расчетам в различных агентствах показал близкий результат, а решение в рамках двойного диполя выполнено по представительной выборке данных с широким азимутальным окружением источника излучения сейсмических волн. Надежность решения фокального механизма по первым вступлениям *P*- волн подтверждается также тем фактом, что на стереограмме механизма очага сейсмостанции Крыма оказались расположенными вблизи нодальных плоскостей (рис. 5а), вдоль которых излучение продольных волн минимальное, а поперечных — максимальное. Это, соответственно, отразилось на волновых формах землетрясения: очень слабые колебания продольных волн и во много раз превосходящие — поперечных (см. примеры на рис. 2 и 5б).

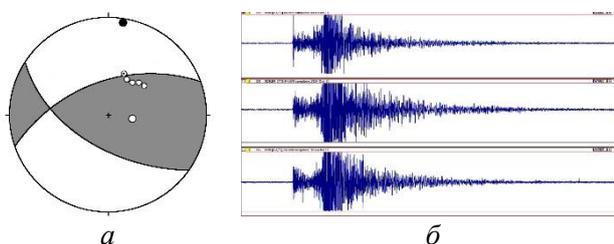


Рис. 5. Положение сейсмостанций Крыма (светлые мелкие кружки) на стереографической проекции механизма очага 11.10.2024 г. (а) и соответствующая сейсмограмма на станции «Судак» (б).

На четырех станциях: ALU, YAL, SUDU, SEV произошел «зашкал» (выход амплитуд за пределы динамического диапазона записи—пример на рис.5б) максимальных амплитуд *S*- волн (табл. 3), а отношения амплитуд $a=As/Ap$ для других станций в несколько раз превысили среднее региональное значение $As/Ap=4$ [18].

Таблица 3.

Отношения амплитуд продольных *P*-волн и поперечных *S*-волн ($a = As/Ap$) записей землетрясений 2024 г. 17 января и 11 ноября на станциях Крыма

Дата	ALU		SIM		SUDU		YAL		DNZ		SEV	
	<i>a</i>	AZ	<i>a</i>	AZ								
17.01	14	42	4.3	25	1.3	48	3	42	6.3	354	1.0	15
11.10	↑ s	45	13.0	38	↑ s	47	↑ s	45	7.8	24	↑ s	39

Примечание: ↑ s — «зашкал» максимальных колебаний записи поперечных волн.

Составлено авторами.

В связи с этим для расчета амплитудных спектров и оценки динамических параметров очагов стало возможным использовать по этим станциям только записи продольных волн (табл. 4). Для другого землетрясения 17 января подобная ситуация не наблюдалась и расчет динамических параметров выполнен по всем составляющим записи (табл. 4).

Динамические параметры очагов. Для большинства землетрясений динамические

параметры очагов рассчитаны по нескольким независимым стационарным определениям и разным типам волн. Вычисление их средних значений (S) и стандартных отклонений (δS) выполнено с учетом логнормального закона распределения величин [10]. Стационарные параметры радиационного трения $\Delta\sigma$, получились отрицательными или знакопеременными, в связи с этим их среднее значение вычислено по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$. Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое (M_w^*) с соответствующей погрешностью. Результаты расчета индивидуальных и средних значений динамических параметров очагов приведены в таблице 4.

Как видно из табл. 4 наименьшие стандартные отклонения δS получены для динамических параметров, оцененных по группе независимых стационарных определений. Использование для расчетов нескольких станций и разных типов волн позволяет нивелировать влияние локальных грунтовых условий под станциями регистрации и на пути очаг-станция, а также неравномерность направленности излучения сейсмических волн.

Таблица 4.
Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2024 год

Станция	Волна	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	$\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{y} \cdot 10^{-2}$, м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па	$\Delta\sigma_f \cdot 10^5$, Па	$E_0 \cdot 10^8$, Дж	M_w^*
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Землетрясение 17 января, $t_0=07^h34^m 02.5^s$ (№ 1 в табл. 1)															
YAL	P	Z	85	0.15		2.95	120	0.83	9.04	30.1	1.83	5.63	-1.1	180	3.99
YAL	S	N+E	85		1.35	1.85	123	0.76	12	40.1	2.23	5.45	0.57	247	4.0
ALU	P	Z	114	0.1		3.0	110	0.82	8.75	29.2	1.74	6.11	-1.76	160	3.96
ALU	S	N+E	114		1.7	1.6	140	0.88	8.87	29.6	1.9	4.79	-0.36	207	4.03
SIM	P	Z	126	0.07		3.1	92.8	0.79	8.14	27.1	1.57	7.24	-3.17	126	3.92
SIM	S	N+E	126		2.4	1.55	152	0.91	8.72	29.1	1.93	4.43	-0.06	221	4.06
DNZ2	P	Z	163	0.22		2.9	140	0.85	10.0	33.5	2.06	4.81	0.21	234	4.03
DNZ2	S	N+E	163		5.0	1.6	192	0.84	14.3	47.5	2.9	3.5	3.6	455	4.13
S - среднее значение							131	0.83	9.8	32.7	2	5.14	-0.24	214	4.0
δS - стандартное отклонение							0.03	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03		0.06	0.04
Землетрясение 26 марта, $t_0=23^h53^m 12.7^s$ (№ 2 в табл. 1)															
YAL	P	Z	277	0.016		4.2	18	0.59	3.92	13.1	0.56	3.33	-1.37	11.8	3.44
YAL	S	N+E	227		0.09	2.85	19.3	0.5	6.89	23	0.83	3.1	0.35	22.2	3.46
OPUK	S	N+E	79		0.3	2.6	19.5	0.54	5.29	17.6	0.7	3.07	-0.4	17.2	3.46

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2024 ГОДА

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SUDU	S	N+E	161		0.15	2.8	21.0	0.51	7.12	23.7	0.87	2.85	0.71	24.9	3.48
S - среднее значение							19.42	0.53	5.65	18.8	0.73	3.1	-0.28	18.3	3.46
δS - стандартное отклонение							0.014	0.016	0.06	0.06	0.04	0.014		0.07	0.01
Землетрясение 14 апреля, $t_0=15^h 39^m 46.2^s$ (№ 3 в табл. 1)															
DNZ2	P	Z	118	0.02		4.5	8.22	0.52	2.6	8.66	0.33	2.6	-1.29	3.56	3.21
DNZ2	S	N+E	118		0.3	2.8	14.1	0.48	5.72	19.1	0.66	1.48	1.38	13.7	3.38
S - среднее значение							10.77	0.5	3.86	12.7	0.47	1.96	-0.03	6.98	3.3
δS - стандартное отклонение							0.12	0.02	0.17	0.17	0.15	0.12		0.29	0.09
Землетрясение 21 мая, $t_0=19^h 49^m 40.0^s$ (№ 4 в табл. 1)															
YAL	S	N+E	101		0.015	5.0	1.24	0.27	2.82	9.38	0.18	6.07	-4.67	0.6	2.67
Землетрясение 30 мая, $t_0=20^h 50^m 42.2^s$ (№ 5 в табл. 1)															
DNZ2	S	N+E	33		0.01	7.0	0.26	0.2	1.4	4.23	0.06	1.98	-1.28	0.06	2.22
Землетрясение 19 июня, $t_0=07^h 57^m 23.5^s$ (№ 6 в табл. 1)															
SUDU	P	Z	153	0.018		4.8	8.46	0.47	3.67	12.2	0.41	3.54	-1.71	5.18	3.22
SUDU	S	N+E	153		0.06	3.1	6.16	0.41	3.96	13.2	0.39	4.87	-2.89	4.06	3.13
DNZ2	P	Z	158	0.018		4.8	8.71	0.47	3.78	12.6	0.43	3.45	-1.56	5.48	3.23
DNZ2	S	N+E	158		0.14	3.0	9.24	0.42	5.38	17.9	0.55	3.25	-0.56	8.28	3.25
S - среднее значение							8.05	0.44	4.15	13.8	0.44	3.73	-1.66	5.56	3.21
δS - стандартное отклонение							0.04	0.016	0.04	0.04	0.03	0.04		0.06	0.04
Землетрясение 2 июля, $t_0=22^h 52^m 24.0^s$ (№ 7 в табл. 1)															
YAL	P	Z	33	0.009		8.5	0.76	0.27	1.62	5.39	0.1	1.25	-0.43	0.2	2.52
YAL	S	N+E	33		0.023	5.5	0.37	0.24	1.12	3.73	0.07	2.56	-2.0	0.07	2.32
ALU	S	N+E	33		0.032	5.3	0.52	0.25	1.39	4.64	0.09	1.84	-1.14	0.12	2.41
S - среднее значение							0.53	0.25	1.36	4.54	0.09	1.8	-1.12	0.12	2.42
δS - стандартное отклонение							0.09	0.01	0.05	0.05	0.05	0.09		0.13	0.07
Землетрясение 13 июля, $t_0=03^h 22^m 20.0^s$ (№ 8 в табл. 1)															
OPUK	S	N+E	71		0.14	3.2	3.48	0.37	2.95	9.82	0.27	0.5	0.93	1.71	2.96
Землетрясение 1 сентября, $t_0=20^h 50^m 57.9^s$ (№ 9 в табл. 1)															
OPUK	P	Z	54	0.01		4.4	5.2	0.51	1.77	5.88	0.21	16.0	-15.1	1.55	3.09
OPUK	S	N+E	54		0.15	2.5	4.64	0.51	1.56	5.2	0.19	18.2	-17.5	1.21	3.05
SUDU	P	Z	125	0.008		4.8	4.10	0.47	1.78	5.93	0.2	20.6	-19.7	1.22	3.01
SUDU	S	N+E	125		0.13	3.0	11.1	0.42	6.47	21.6	0.66	7.60	-4.36	12.0	3.3
YAL	P	Z	191	0.005		4.6	7.01	0.49	8.92	3.77	0.35	12.1	-10.7	3.13	3.17
YAL	S	N+E	191		0.12	3.0	15.3	0.42	8.91	29.7	0.91	5.52	-1.07	22.7	3.39
SIM	P	Z	195	0.012		4.2	8.56	0.53	2.49	8.29	0.32	9.88	-8.63	3.55	3.22
SIM	S	N+E	195		0.03	3.0	4.23	0.42	2.46	8.21	0.25	20.0	-18.7	1.74	3.02
DNZ2	P	Z	274	0.009		4.3	9.07	0.52	2.83	9.42	0.36	9.32	-7.9	4.27	3.24
DNZ2	S	N+E	274		0.06	2.6	11.0	0.49	4.17	13.9	0.49	7.69	-5.6	7.64	3.3
S - среднее значение							7.29	0.48	3.36	9.1	0.34	11.57	-9.89	3.63	3.2
δS - стандартное отклонение							0.06	0.013	0.09	0.09	0.07	0.06		0.14	0.12

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Землетрясение 11 октября, $t_0=07^h 16^m 39.4^s$ (№ 10 в табл. 1)																
YAL	P	Z	303	0.1		2.8	3620	0.83	200	665	40.2	22.8	76.9	87100	4.88	
DNZ2	P	Z	340	0.2		2.8	2600	0.83	198	661	40.0	23	76.1	86000	4.88	
DNZ2	S	N+E	340		8.0	1.6	2790	0.84	207	691	42.1	21.5	82.1	96300	4.90	
SUDU	P	Z	382	0.3		2.85	3160	0.82	254	846	50.3	18.9	109	134000	4.94	
SIM	P	Z	338	0.2		2.9	3020	0.80	255	851	49.7	19.8	108	128000	4.92	
SIM	S	N+E	338		5.0	1.55	2840	0.86	192	639	40.2	21.1	74.8	90700	4.91	
ALU	S	N+E	332		4.8	1.7	3010	0.79	269	896	51.4	19.9	115	135000	4.92	
S - среднее значение								2991	0.82	223	743	45	21	91	106114	4.91
δS - стандартное отклонение								0.017	0.005	0.02	0.02	0.02	0.01		0.03	0.02
Землетрясение 28 октября, $t_0=15^h 31^m 49.0^s$ (№ 11 в табл. 1)																
YAL	S	N+E	23		0.06	5.1	0.65	0.26	1.57	5.2	0.1	2.9	-2.1	0.17	2.48	
ALU	P	Z	16	0.015		8.6	0.68	0.27	1.51	5.03	0.1	2.77	-2.02	0.17	2.49	
ALU	S	N+E	16		0.1	4.9	0.87	0.27	1.86	6.2	0.12	2.17	-1.24	0.27	2.56	
S - среднее значение								0.73	0.27	1.64	5.45	0.11	2.6	-1.78	0.2	2.51
δS - стандартное отклонение								0.04	0.005	0.028	0.03	0.03	0.04		0.07	0.03
Землетрясение 28 октября, $t_0=15^h 41^m 25.4^s$ (№ 12 в табл. 1)																
YAL	P	Z	23	0.01		8.2	0.7	0.27	1.49	4.98	0.1	5.47	-4.72	0.17	2.5	
YAL	S	N+E	23		0.08	5.0	1.01	0.25	2.71	9.03	0.17	3.75	-2.4	0.45	2.61	
ALU	P	Z	16	0.012		8.0	0.51	0.28	1.03	3.42	0.07	7.4	-6.88	0.09	2.41	
ALU	S	N+E	16		0.3	4.9	2.09	0.26	5.3	17.7	0.33	1.81	0.84	1.85	2.82	
S - среднее значение								0.93	0.26	2.17	7.22	0.14	4.1	-3	0.34	2.59
δS - стандартное отклонение								0.13	0.01	0.16	0.16	0.15	0.13		0.29	0.13
Примечание: $\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с – спектральная плотность по полному вектору колебаний поперечной волны (N+E)																

Наилучшая сходимость всех станционных определений (табл. 4) получена для землетрясений 17 января и 11 ноября с минимальными стандартными отклонениями $\delta S \leq 0.03$ для всех динамических параметров. В этом случае основной вклад в минимизацию погрешностей был внесен учетом реальной поправки за направленность очагового излучения объемных волн на сейсмические станции ($R_{0\phi}$), рассчитанной по параметрам механизма очага (табл. 2). Для трех относительно слабых сейсмических толчков (№ 4, 5, 8) с энергетическим классом $K_{II} = 6.4 - 8.3$ динамические параметры определены по спектрам записей только S - волн на одной из ближайших к очагу станции. При этом полученные значения очаговых параметров относятся не к средним, а станционным, дополняющим статистические данные по станции «Ялта» и новым автономным станциям «Донузлав» и «Опук». Радиационное трение $\Delta\sigma_r$ для изученных землетрясений 2024 г., кроме наиболее сильного 11 октября, имело отрицательное значение, что в соответствии с [14] может быть связано со сложным процессом вспарывания разрыва в очаге за счет неравномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах.

Наибольшие значения всех динамических параметров получены для землетрясения 11 октября с $K_{\Pi} = 12.9$, а наименьшие – для самого слабого сейсмического события 30 мая с $K_{\Pi} = 6.4$, как и следует из установленных зависимостей роста количественных значений динамических параметров очагов от энергетического уровня землетрясений за предыдущий длительный период наблюдений [19,20] (рис. 6).

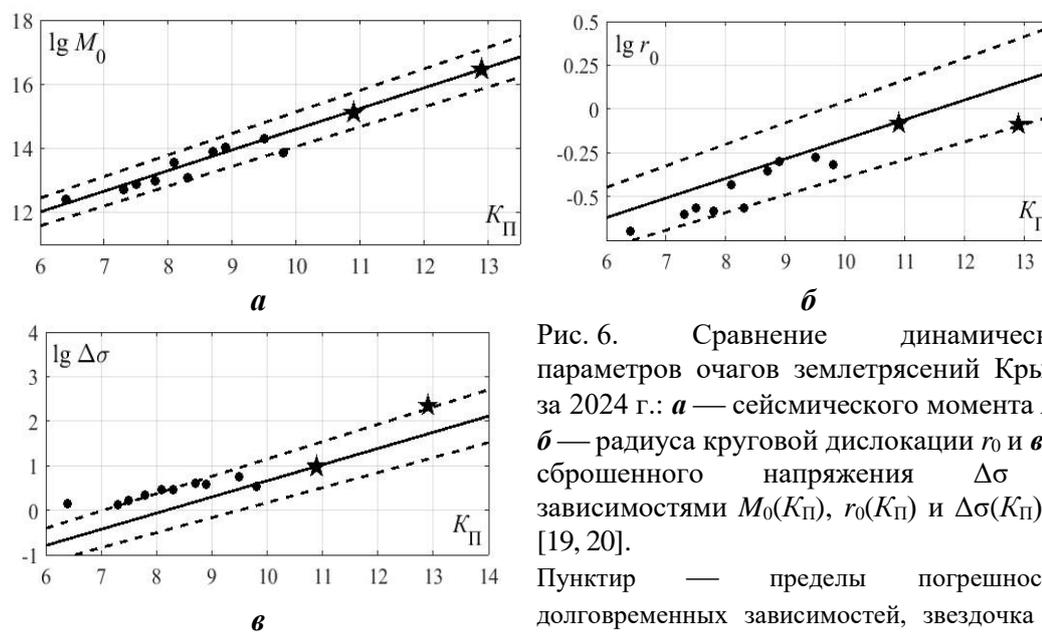


Рис. 6. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2024 г.: **а** — сейсмического момента M_0 , **б** — радиуса круговой дислокации r_0 и **в** — сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ с зависимостями $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ и $\Delta\sigma(K_{\Pi})$ из [19, 20].

Пунктир — пределы погрешностей долговременных зависимостей, звездочка — значения для землетрясения с известным механизмом очага.

Из сравнения (рис. 6) видно, что средние значения основных очаговых параметров: M_0 , r_0 и $\Delta\sigma$ землетрясений за 2024 г. соответствуют долговременным корреляционным связям $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ и $\Delta\sigma(K_{\Pi})$ и находятся в диапазоне их доверительного интервала. Для землетрясений 17.01. и 11.10. для которых в расчет сейсмического момента введена реальная поправка $R_{0ф}$, получено практически полное соответствие значений M_0 средним долговременным $M_0(K_{\Pi})$. Можно также отметить, что если значения M_0 (рис. 6а) за 2024 г равномерно распределены относительно $M_0(K_{\Pi})$, то радиусы дислокации r_0 (рис. 6б) в основном оказались ниже аппроксимирующей $r_0(K_{\Pi})$, а сброшенные напряжения – выше $\Delta\sigma(K_{\Pi})$.

Поскольку параметры очагов большинства землетрясений 2024 г. относятся к достаточно надежным, то их вариации внутри интервала погрешностей $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ и $\Delta\sigma(K_{\Pi})$ можно объяснить особенностями свойств глубинной среды, вмещающей очаги и индивидуальными свойствами физических процессов снятия напряжений. Так дислокация в очаге землетрясения 11.10.2024 г. произошла на сравнительно малой площади разрыва с заниженным радиусом r_0 (рис. 6б) при повышенном сброшенном напряжении $\Delta\sigma$ (рис. 6в). Для этого землетрясения получены также завышенные для данного энергетического уровня значения

величины подвижки по разрыву \bar{u} , деформации сдвига ε в окрестности очага, а также энергии образования дислокации в очаге E_d (табл. 4).

Соответственно доля полной энергии деформации среды (M_0), потраченной на дислокацию в очаге (d) этого землетрясения, превысила долю сейсмической энергии e , излученной в виде сейсмических колебаний (табл. 5) почти в полтора раза ($e/d = 0.75$). Для большинства остальных землетрясений соотношение дислокационной и сейсмической энергии было обратным, т.е. большая часть общей очаговой энергии перешла в сейсмические колебания по сравнению с той, что пришлось на дислокационный процесс: $e/d = 1.6 - 17.3$ (табл. 5).

Таблица 5.

Приведенная сейсмическая и дислокационная энергия землетрясений Крыма
2024 года

Дата δ м	K_{II}	$E_s \cdot 10^8$, Дж	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	$E_d \cdot 10^8$, Дж	$e \cdot 10^{-5}$	$d \cdot 10^{-5}$	e/d
17.01	10.9	794	131	214	6.1	1.6	3.8
26.03	9.5	31.6	19.47	18.3	1.6	0.9	1.8
14.04	8.9	31.6	10.77	6.28	2.9	0.58	5.0
21.05	8.3	2.0	1.24	0.6	1.6	0.48	3.3
30.05	6.4	0.025	0.26	0.06	0.10	0.23	0.4
19.06	8.7	5.01	8.05	5.56	0.6	0.7	0.9
02.07	7.3	0.2	0.53	0.12	0.37	0.23	1.6
13.07	8.1	1.25	3.48	1.73	0.36	0.5	0.7
01.09	9.8	63.1	7.29	3.63	8.65	0.5	17.3
11.10	12.9	79432	2991	106114	26.5	35.5	0.75
28.10	7.5	0.31	0.73	0.2	0.42	0.27	1.6
28.10	7.8	0.63	0.93	0.34	0.7	0.36	1.9

В целом в изученных землетрясениях региона за 2024 год приведенная сейсмическая энергия e находилась в пределах $e = 0.1 \cdot 10^{-5} - 26.5 \cdot 10^{-5}$, в зависимости от энергетического масштаба событий. При таком диапазоне e по классификации из работы [21] рассмотренные землетрясения относятся к «нормальным».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены новые экспериментальные данные об очаговых параметрах 12 землетрясений Крымско-Черноморского региона в диапазоне энергетических классов $K_{II} = 6.4 - 12.9$, зарегистрированных сетью цифровых сейсмических станций Крыма в 2024 году.

С использованием волновых форм объемных сейсмических волн и рассчитанных по ним амплитудных спектров восстановлены динамические и энергетические характеристики очагов землетрясений: M_0 — скалярный сейсмический момент, r_0 — радиус круговой дислокации, $\Delta\sigma$ — сброшенное напряжение, $\eta\sigma$ — кажущееся напряжение, $\Delta\sigma_r$ — радиационное трение, ε — деформация сдвига в окрестности очага, \bar{u} — средняя подвижка по разрыву, E_d — энергия образования дислокации в очаге, магнитуда M_w по сейсмическому моменту. Новые данные за 2024 г.

соответствуют средним долговременным параметрам и их зависимостям от энергетического уровня землетрясений в пределах доверительного интервала определяемых величин.

Для двух наиболее сильных землетрясений 17 января с $M_w = 4.0$ и 11 ноября с $M_w = 4.9$ получены кинематические параметры очагов по решениям фокальных механизмов. Тип подвижки в очаге землетрясения 17 января, произошедшего в зоне сопряжения Южнобережного и Одесско-Синопского глубинных разломов – крутой сброс активного крыла разрыва под действием растягивающих напряжений близ меридионального направления.

Землетрясение 11 октября юго-западной части Черноморской впадины возникло в обстановке горизонтального сжатия также меридионального направления. В очаге произошел взбросо-сдвиг с преобладанием взброса над сдвигом. В момент максимального разрушения среды в очаговой зоне направление первичного поля сжимающих напряжений сменилось на диагональное без изменения кинематического типа движения. Возможно, такая инверсия связана с многоактностью разрыва в очаге.

Доля полной очаговой энергии (M_0), излученной в виде сейсмических колебаний E_s (приведенная сейсмическая энергия e) при всех землетрясениях 2024 г. составила $e = 0.6 \cdot 10^{-5} - 26.5 \cdot 10^{-5}$, при среднем значении $e = 4.2 \cdot 10^{-5}$, что, следуя классификации по работе [21], соответствует категории «нормальных» сейсмических событий. При этом в большинстве случаев очаговая энергия, которая перешла в сейсмические колебания превосходила энергию образования дислокации в очаге в среднем в 3 раза.

Список литературы

1. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуа и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Том 2. С. 113–125.
2. International Seismological Centre [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/> (дата обращения: 01.02.2024).
3. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э.Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016 год // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология, Том 3(69), № 4, 2017. С. 51–69.
4. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., Борисенко Л.С., Поречнова Е.И. Общее сейсмическое районирование территории Крыма (ОСР-98) // Геофизический журнал. 1999. N 6. С. 3–15.
5. Балакина Л.А., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 198 с.
6. Введенская А.В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
7. Кульчицкий В.Е. Новые годографы сейсмических волн Крымско-Черноморского региона // Ученые записки Крымского федерального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Том 4(70). № 4. С. 164–173.
8. Kennet, B.L.N. Seismological Tables: ak 135. Research School of earth Sciences Australian national University. Australia, Canberra, АСТ0200, 2005. 80 p.
9. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research, 1970. V. 75, N 26. P. 4997–5009.
10. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма – Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
11. Пустовитенко Б.Г., Раутиан Т.Г. Применение сейсмической коды к исследованию затухания сейсмических волн в Крымском регионе // Геофизический сборник. 1977. Вып. 78. С. 3–14.

12. Пустовитенко Б.Г., Свидлова В.А. Энергетическая классификация местных землетрясений Крыма по записям сейсмической коды на сейсмостанции «Судак» // Сейсмологический бюллетень Украины за 1998 г. Симферополь: ИГ НАНУ, КЭС. 2000. С. 81–90.
13. Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И., Зобин В.М., Коган С.Я., Корчагина О.А., Москвина А.Г., Поликарпова Л.А., Чепкунас Л.С. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от стационарного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 66–79.
14. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
15. Hanks Т.С., Kanamori Н. А moment magnitude scale // Journal of Geophysical Research. 1979. V. 84, N B5. P. 2348–2350.
16. Кейлис-Борок В.И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений // Труды Геофизического Института АН СССР. 1959. № 9 (136). С. 20–42.
17. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Особенности очаговых параметров землетрясений Крыма 2023 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им В.И. Вернадского. География. Геология. 2024. Том 10 (76). №4. С.130–151.
18. Пустовитенко Б.Г., Лущик А.В., Боборыкина О.А, Кульчицкий В.Е., Можжерина А.В., Насонкин В.А., Панков Ф.Н., Поречнова Е.И., Пустовитенко А.А, Тихоненков Э.П., Швырло Н.И. Мониторинг сейсмических процессов в Крымско-Черноморском регионе. Севастополь: НПЦ ЭКОСИ "Гидрофизика", 2014. 264 с.
19. Пустовитенко Б.Г., Пустовитенко А.А., Капитанова С.А., Поречнова Е.И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 238–242.
20. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Изучение напряжений и деформации в очаговых зонах землетрясений Крыма по спектрам записей сейсмических волн // Современная тектонофизика. Методы и результаты, 2019. С. 193–198.
21. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М: ГЕОС, 2016. 424 с.

FOCAL EARTHQUAKE PARAMETERS OF CRIMEA IN 2024

Pustovitenko B. G.¹, Eredzhepov E. E.², Bondar M. N.³

^{1,2,3}Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities, Simferopol, Russian Federation

³Institute of seismology and geodynamics FSAEI HE «Of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University», Simferopol, Russian Federation

E-mail: ¹bpustovitenko@mail.ru

New results of studying and analyzing the spectral, kinematic, dynamic, and energy characteristics of earthquake foci in the Crimean-Black Sea region based on seismic monitoring data from a network of Crimean stations in 2024 are presented. The kinematic focal parameters were restored for the two strongest earthquakes on January 17 with $M_w=3.8$ and on October 11 with $M_w=4.9$ according to the data of the focal mechanism solution within the dislocation model of a double dipole.

The type of movement in the earthquake on January 17, which occurred in the intersection zone of the Yuzhnoberezhny and Odessa-Sinop deep faults, is a steep discharge under the influence of tensile stresses.

The earthquake on October 11 occurred in the southwestern part of the Black Sea basin in an environment of horizontal compression. A surge occurred in the hearth, with a predominance of surge over shear. According to the seismic moment tensor method, the direction of the primary field of compressive stresses changed to a diagonal one without changing the kinematic type of motion.

The spectral, dynamic, and energy parameters of the foci (f_0 , M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \bar{u} , Eu и Mw) were studied for 12 earthquakes using the amplitude spectra of volumetric seismic waves using the theoretical Brun dislocation model (ω -2). The new data for 2024 correspond to the long-term average parameters and their dependencies on the energy level of earthquakes within the confidence interval of the determined values. During most earthquakes in 2024, the proportion of total focal energy radiated in the form of seismic vibrations exceeded the energy of dislocation formation in the focus by an average of 3 times.

Keywords: source mechanism, amplitude spectrum, the Brune model, power spectral density, angular frequency, source dynamic parameters, reduced seismic energy.

References

1. Pustovitenko B.G., Kul'chickij V.E. Ob energeticheskoy ocenke zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (On the energy assessment of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). Magnituda i energeticheskaya klassifikaciya zemletryasenij. M.: IFZ AN SSSR, 1974, V. 2, pp. 113–125 (in Russian).
2. International Seismological Centre [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/> (data obrashcheniya: 01.02.2024).
3. Pustovitenko B.G., Jeredzhepov E.E. Ochagovye parametry zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona 2016 goda (Focal parameters of 2016 Crimean-Black Sea region earthquakes). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografija. Geologija. 2017. 3(69). No 4. pp. 51–69 (in Russian).
4. Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E., Borisenko L. S., Porechnova E. I. Obshhee sejsmicheskoe rajonirovanie territorii Kryma (OSR-98) (General seismic zoning of the territory of Crimea (GSZ-98)). Geofizicheskij zhurnal, 1999, no. 6, pp. 3–15 (in Russian).
5. Balakina L.A., Vvedenskaya A.V., Golubeva N.V., Misharina L.A., Shirokova E.I. Pole uprugih napryazhenij Zemli i mekhanizm ochagov zemletryasenij. (Field of elastic stresses of the Earth and the mechanism of earthquake foci). Moscow: Nauka Publ., 1972, 198 p. (in Russian).
6. Vvedenskaya A.V. Issledovaniya napryazhenij i razryvov v ochagah zemletryasenij pri pomoshchi teorii dislokacij (Study of stresses and ruptures in earthquake sources using the theory of dislocation). M.: Nauka, 1969, 136 p. (in Russian).
7. Kul'chickij V.E. Novye godografy sejsmicheskikh voln Krymsko-Chernomorskogo regiona (New travel time curves of seismic waves of the Crimean-Black Sea region). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografija. Geologija, 2018, V. 4(70), no. 4, pp. 164–173 (in Russian).
8. Kennet, B.L.N. Seismological Tables: ak 135. Research School of earth Sciences Australian national University. Australia, Canberra, ACT0200, 2005. 80 p.
9. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // Journal of Geophysical Research, 1970. V. 75, N 26. P. 4997–5009.
10. Pustovitenko B.G., Panteleeva T.A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma (Spectral and focal parameters of Crimea earthquakes). Kiev: Naukova dumka, 1990, 251 p. (in Russian).
11. Pustovitenko B.G., Rautian T.G. Primenenie sejsmicheskoy kody k issledovaniyu zatuhaniya sejsmicheskikh voln v Krymskom regione (Application of seismic code to the study of seismic wave attenuation in the Crimean region). Geofizicheskij sbornik, 1977, no. 78, pp. 3–14 (in Russian).
12. Pustovitenko B.G., Svidlova V.A. Energeticheskaya klassifikaciya mestnyh zemletryasenij Kryma po zapisyam sejsmicheskoy kody na sejsmostancii «Sudak» (Energy classification of local earthquakes in Crimea based on seismic data from the Sudak seismic station). Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 1998 g., 2000, pp. 81–90 (in Russian).
13. Aptekman Zh.Ya., Belavina Yu.F., Zaharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., Polikarpova L.A., Chepkunas L.S. Spektiry P-voln v zadache opredeleniya dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij. Perekhod ot stacionnogo spektra k ochagovomu i raschet dinamicheskikh parametrov ochaga (P-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake

- sources. Transition from the station spectrum to the focal spectrum and calculation of the dynamic parameters of the focal point). *Vulkanologiya i seismologiya*, 1989, no. 2, pp. 66–79 (in Russian).
14. Kostrov B.V. *Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya* (The mechanics of the source of a tectonic earthquake). M.: Nauka, 1975. 179 p. (in Russian).
 15. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale // *Journal of Geophysical Research*. 1979. V. 84, N B5. P. 2348–2350.
 16. Kejlis-Borok V.I. *Issledovanie istochnikov, priblizhenno jekvivalentnyh ochagam zemletrjasenij* (Study of the sources, approximately equivalent to the foci of earthquakes). *Trudy Geofizicheskogo Instituta AN SSSR*. 1959. 9(136), pp. 20–42 (in Russian).
 17. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E., Bondar M.N. *Osobennosti ochagovyh parametrov zemletryasenij Kryma 2023 goda* (Features of focal parameters of the 2023 Crimea earthquakes). *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografija. Geologija*. 2024. 10(76). No 4. pp. 130–151 (in Russian).
 18. Pustovitenko B.G., Lushchik A.V., Boborykina O.V., Kul'chickij V.E., Mozhzherina A.V., Nasonkin V.A., Pankov F.N., Porechnova E.I., Pustovitenko A.A., Tihonenkov E.P., Shvyrlo N.I. *Monitoring seismicheskikh processov v Krymsko-Chernomorskom regione* (Monitoring of seismic processes in the Crimean Black Sea region). Sevastopol': NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2014, 264 p. (in Russian).
 19. Pustovitenko B.G., Pustovitenko A.A., Kapitanova S.A., Porechnova E.I. *Prostranstvennye osobennosti ochagovyh parametrov zemletrjasenij Kryma* (Spatial features of focal parameters of Crimean earthquakes). *Seismichnost' Severnoj Evrazii. Obninsk, Russia: GS RAS Publ.*, 2008, pp. 238–242. (in Russian).
 20. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E. E. *Izucheniye napryazhenij i deformacii v ochagovyh zonah zemletryasenij Kryma po spektram zapisej seismicheskikh voln* (The study of stress and strain in the source zones of earthquakes in the Crimea on the spectra of seismic wave records). *Sovremennaya tektonofizika. Metody i rezul'taty*, 2019, pp. 193–198 (in Russian).
 21. Kocharyan G.G. *Geomechanics of Faults*. M.: GEOS, 2016, 424 p.

Поступила в редакцию 30.11.2025 г.