

УДК 550.348.435

DOI: 10.46698/VNC.2026.17.22.001

Оригинальная статья

Общие свойства и особенности очаговых параметров землетрясений юго-запада Черноморской впадины

Б.Г. Пустовитенко[✉], Э.Э. Эреджепов[✉]

Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства, Россия, 295013, г. Симферополь, ул. Севастопольская, 45, e-mail: bpustovitenko@mail.ru

Статья поступила: 26.11.2025, доработана: 30.01.2026, принята к публикации: 03.02.2026

Резюме: Актуальность работы. Для оценки сейсмической опасности территории Крыма необходимы знания о моделях очагов, параметрах сейсмогенерирующих структур и сейсмичности всего Крымско-Черноморского региона, включая бассейн Черного моря. Юго-западная часть Черноморской впадины в этом отношении менее изучена, чем другие районы региона. Очаговые параметры землетрясений являются также одними из главных, по которым реконструируются геодинамические модели литосферы морских территорий, скрытых от прямых наблюдений. **Цель исследования.** Оценка и сравнительный анализ кинематических, спектральных, динамических и энергетических параметров очагов наиболее сильных землетрясений с магнитудой $M_w=4.1-5.1$ южной части Западно-Черноморской впадины, для установления их общих свойств и особенностей. **Методы исследования.** Спектральный метод Фурье для расчета спектров объемных сейсмических волн и оценки по ним динамических параметров очагов в рамках теоретической модели Брюна (ω^{-2}). Сравнение полученных результатов с долговременными параметрами для данного энергетического уровня. Применение модели источника в виде двойного диполя для восстановления кинематических характеристик – фокального механизма. Сравнение полученных решений механизма очагов землетрясений с опубликованными данными о параметрах их центроидов. Исследование индивидуальных особенностей очаговых параметров и их общих свойств. **Результаты исследования.** Получены новые данные об очаговых параметрах наиболее сильных землетрясений юго-запада Черноморской впадины, произошедших в период 2016–2024 гг. Все землетрясения возникли в обстановке горизонтальных напряжений сжатия со взбросовой подвижкой в очагах в ограниченной области литосферы, представленной в виде эллипсоида, вытянутого в азимуте около 45° по отношению к сейсмическим станциям Крыма. Динамические и энергетические параметры очагов восстановлены по группе независимых определений и относятся к категории надежных. Новые экспериментальные данные могут служить основой разработки моделей очагов и сейсмогенерирующих структур юго-запада Черноморской впадины.

Ключевые слова: фокальный механизм, сейсмический момент, радиус круговой дислокации, сброшенное напряжение, энергия дислокации, сейсмическая энергия.

Для цитирования: Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э. Общие свойства и особенности очаговых параметров землетрясений юго-запада Черноморской впадины. *Геология и геофизика Юга России*. 2026. 16(1): 44-56. DOI: 10.46698/VNC.2026.17.22.001

DOI: 10.46698/VNC.2026.17.22.001

Original article

General properties and features of earthquake source parameters in the southwestern part of the Black Sea Basin

B.G. Pustovitenko^{ORCID}, E.E. Eredzhepov^{ORCID}

Crimean Republican Center for Assessment of Seismic and Landslide Hazards,
Technical Survey of Construction Facilities, 45 Sevastopolskaya Str., Simferopol 295013,
Russian Federation, e-mail: bpustovitenko@mail.ru

Received: 26.11.2025, revised: 30.01.2026, accepted: 03.02.2026

Abstract: Relevance. Assessing the seismic hazard of the Crimean territory requires knowledge of earthquake source models, parameters of seismogenic structures, and seismicity across the entire Crimean-Black Sea region, including the Black Sea basin. The southwestern part of the Black Sea Basin is less studied in this regard than other areas of the region. Earthquake source parameters are also among the key parameters used to reconstruct geodynamic models of the lithosphere in marine areas hidden from direct observation. **Aim.** Assessment and comparative analysis of the kinematic, spectral, dynamic, and energy parameters of the strongest earthquakes with $M_w=4.1-5.1$ that occurred in the southern part of the Western Black Sea Trench, in order to establish their common properties and features. **Methods.** The Fourier spectral method was used for calculating the body wave spectra and estimating the dynamic parameters of earthquakes based on them within the framework of the theoretical dislocation model of Brun (ω^{-2}). Comparison of the obtained results with long-term parameters for a given energy level. Application of the dislocation model of the source in the form of a double dipole to restore the kinematic characteristics – focal mechanism. Comparison of the obtained solutions of the mechanism of earthquake sources with the published data on the parameters of their centroids. Research of individual features of focal parameters and their general properties. **Results.** New data on the focal parameters of the four strongest earthquakes, which occurred in the period 2016–2024 in the southern part of the Western Black Sea depression, have been obtained. All the earthquakes occurred in a situation of horizontal compression stresses with reverse movement in the foci in a relatively limited area of the lithospheres, represented as an ellipsoid, elongated in a north-eastern direction at an azimuth of about 45° relative to the seismic stations in Crimea. The dynamic and energy parameters of the foci have been restored based on a group of independent determinations with a low standard deviation and are considered reliable. The new experimental data can serve as a basis for developing models of the foci and seismogenic structures in the south of the western Black Sea depression.

Keywords: focal mechanism, seismic moment, circular dislocation radius, released stress, dislocation energy, seismic energy.

For citation: Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E. General properties and features of earthquake source parameters in the southwestern part of the Black Sea Basin. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2026. 16(1): 44–56. DOI: 10.46698/VNC.2026.17.22.001

Введение. Постановка задачи

Сейсмоактивная область Западно-Черноморской впадины входит в пределы границ Крымско-Черноморского региона, принятых в 1985 г. [Землетрясения ..., 1988, с. 4–6] при регионализации территорий для проведения сейсмического мониторинга сетью региональных сейсмостанций Крыма и параметризации активных сейсмогенерирующих структур региона (зон ВОЗ) для оценки долговременной сейсмической опасности.

В связи с удаленностью от сейсмических станций Крыма, этот район слабо изучен в сейсмическом отношении, т.к. технические возможности сейсмической ап-

паратуры и их малочисленность на полуострове многие годы не позволяли надежно регистрировать слабые толчки с энергетическими классами $K_{п} \leq 10$ (по региональной энергетической шкале) и магнитудами $M_w \leq 3.5$. В современную эпоху цифровой регистрации и оперативного получения исходной информации с других станций Мировой сети стало возможным понизить энергетический порог представительных землетрясений во всем регионе, включая южную часть Западно-Черноморской впадины и увеличить точность определения основных параметров гипоцентров. Одновременно появилась возможность надежно решать обратные задачи по физике очага землетрясений: восстанавливать механизм очагов и их динамические параметры – прямые источники информации о геодинамических и тектонофизических процессах в литосфере впадины Черного моря.

Задачей данной статьи явилось совместное рассмотрение очаговых параметров (кинематических, спектральных, динамических и энергетических) наиболее сильных землетрясений с $K_{п} \geq 11$ ($M_w \geq 4$) южной части Западно-Черноморской впадины для выявления их общих свойств и особенностей в целях дальнейшего совершенствования моделей очагов и параметров сейсмогенерирующих структур этого района.

Общие сведения о рассматриваемых землетрясениях

За последние 10 лет сетью сейсмических станций Крыма зарегистрировано 82 землетрясения в диапазоне энергетических классов $K_{п} = 7-13$, произошедших в районе глубоководной впадины Черного моря. Из них 16 с $K_{п} \geq 9$ относятся к южной части Западно-Черноморской впадины в пределах географических координат: $\varphi^{\circ} = 42-43$, $\lambda^{\circ} = 30.5-32$. Четыре наиболее сильных землетрясения за этот период (табл. 1), зарегистрированы не только сеймостанциями Крыма, но также большим количеством станций Мира (ISC – International Seismological Centre. <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin>).

Таблица 1 / Table 1

Основные параметры землетрясений юга Западно-Черноморской впадины за 2016–2024 гг., для которых определены очаговые параметры / Main parameters of earthquakes in the south of the Western Black Sea Basin for 2016–2024, for which focal parameters have been determined

№	Дата, Date	t_0 , ч мин с/ Time, h m s	Эпицентр/ epicenter		h , км/ deep, km	$K_{п}$	M_w/n , (mb)	Источник /Author
			φ° , N	λ° , E				
1	2016.06.28	04 23 48.1	42.46	31.59	35	10.9	4.1/7	[Свидлова и др., 2017 / Svidlova et al., 2017]
		04 23 46.5	42.60	31.60	31		3.5	(ISC)
2	2016.10.15	08 18 33.3	42.12	30.70	17	13.1	5.1/5	[Свидлова и др., 2017 / Svidlova et al., 2017]
		08 18 32	42.19	30.68	5		(5.2)	(ISC)
		08 18 35.9	42.5	31.05	22		5.3	(GCMТ, 2025)
3	2022.04.11	17 38 42.7	42.25	31.35	23	12.0	4.6/7	[Калинюк и др., 2023 / Kalinyuk et al., 2023]
		17 38 41.1	42.39	31.09	7		(4.6)	(ISC)
		17 38 43.0	42.33	31.03	24		4.5	(GCMТ, 2025)
4	2024.10.11	07 16 39.4	42.58	31.42	9	12.9	4.9/7	Наст. статья/ this article
		07 16 44.9	42.72	31.48	17		5.0	(GCMТ, 2025)
		07 16 43	42.63	31.32	10		4.8	(ISC Norsar)
		07 16 49.5	42.65	31.42	11		4.8	(ISC NIEC)

Примечание: значения M_w/n в графе 8 – из табл. 3 настоящей статьи, где n – число станционных определений / Note: the M_w/n values in column 8 are from Table 3 of this article, where n is the number of station definitions.

Это позволило с большой точностью определить основные параметры их гипоцентров, а также по представительной выборке волновых форм надежно восстановить характеристики очаговых процессов.

Основные параметры выбранных для сравнительного анализа землетрясений с $K_p \geq 11$ ($M_w \geq 4.1$) представлены в таблице 1, а их пространственное расположение – на рисунке 1. В таблице 1 приведены также результаты обработки в Международном центре ISC, в том числе данные по методу тензора сейсмического момента (TCM) [Dziewnski et al., 1981], определяющего параметры центроида – центра максимального разрушения среды в гипоцентре очаговой зоны (GCMT – Global Centroid Tensor (GCMT) Catalog Search (2025). <https://www-globalcmt.org>; NEIC – <https://www.isc.ac.uk/cgi-bin/agency-get?agency>; Norsar – Norwegian Seismic Array).

Сравнивая координаты гипоцентров начала разрыва и центроидов (табл. 1), можно сделать предположение, что разрушение среды в очаговых зонах шло сверху вниз ($h_{TCM} > h$), погружаясь в северо-восточном направлении при землетрясениях 15.10.2015 г. и 11.10.2024 г. (азимут 40° и 18° соответственно) и в западном (азимут 289°) – при 11.04.2022 г.

Эпицентры рассматриваемых землетрясений пространственно образовали компактную группу, распределенную на площади в виде эллипса с длиной большой оси около 80 км, вытянутого в северо-восточном направлении, в азимуте около 45° по отношению к сейсмическим станциям Крыма. Очаги землетрясений мигрировали вдоль зоны со средней скоростью волны деформации среды около $V = 10$ км/год.

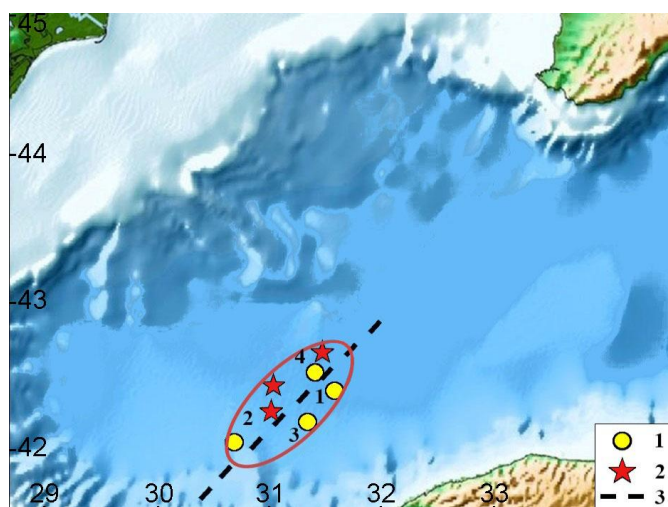


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений южной части Западно-Черноморской впадины за 2016–2024 гг. с $M_w > 4$. 1 – эпицентры землетрясений; 2 – эпицентры центроидов; 3 – большая ось эллипса (зоны очагов).

Цифры рядом с эпицентрами – номера землетрясений по таблице 1 /

Fig. 1. Map of earthquake epicenters in the southern part of the Western Black Sea Trench for 2016–2024 with $M_w > 4$.

1 – earthquake epicenters; 2 – centroid epicenters; 3 – major axis of the ellipse (focal zones).
Numbers are earthquake numbers according to Table 1

С учетом глубин гипоцентров (табл. 1) общий объем среды, вмещающий очаги землетрясений, представлен эллипсоидом размерами примерно $80 \times 30 \times 30$ км с простиранием и заглублением к северо-востоку. Следуя схеме дорифейского фундамента Черного моря [Геология ..., 1987, с. 80, рис. 36] можно предположить, что данная группа сейсмических событий связана с зоной крупного Орехово-Павлоградского мантийного разлома, тянущегося от юго-западной части Турции диагонально к северо-востоку Крыма и Азовскому морю.

Исходные данные и методика исследования

Исходными данными для определения **кинематических** характеристик очагов землетрясений служили знаки первых вступлений продольных сейсмических волн P (сжатия и разрежения) на станциях Крыма и Мировой сети, а также дополнительно собранные по региональным сейсмограммам и сейсмическим бюллетеням Турции и Северного Кавказа. В результате получен статистически представительный материал (от $n=66$ до $n=118$) по станциям, окружающим источники излучения сейсмических волн в широком азимутальном створе для надежного решения механизма очагов с минимальными погрешностями.

Углы выхода сейсмических волн из очага на сейсмические станции регистрации рассчитывались по таблицам из работы [Kennet, 2005], исходя из глубины гипоцентра и удаленности станций регистрации от источника.

Решения механизма очагов (табл. 2, рис. 2) нами получены на основе теории дислокации в рамках модели двойного диполя [Введенская, 1969] по стандартной методике [Балакина и др., 1972]. Для всех землетрясений имеются также опубликованные в (ISC, GCMT) решения фокальных механизмов по методу тензора сейсмического момента (ТСМ). Для наиболее сильного землетрясения 15 октября 2016 г. с $K_{II}=13.1$ параметры фокального механизма по знакам вступления волн P взяты из (ISC) и нами не пересматривались.

Спектральные, динамические и энергетические параметры очагов восстановлены по 42 амплитудным спектрам Фурье цифровых записей объемных волн на шести региональных сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL) и «Донузлав-2» (DNZ2).

Для расчета амплитудных спектров использованы записи только с четкими фазами объемных P - и S -волн, с превышением полезного сигнала над фоном помех в два раза и более. Пример волновых форм землетрясений представлен на рисунке 2.

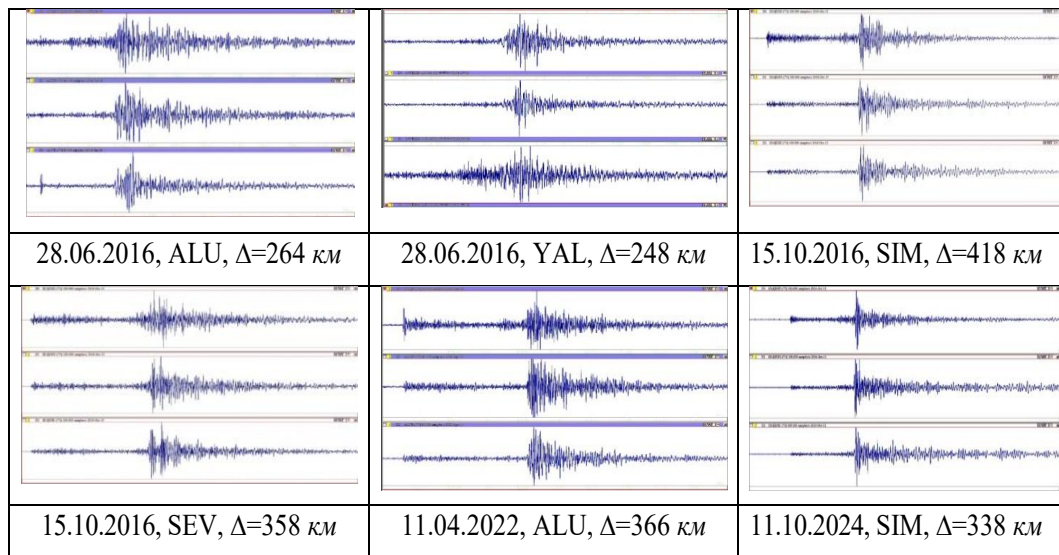


Рис. 2. Примеры волновых форм рассматриваемых землетрясений на сейсмических станциях Крыма. Составляющие записи сверху вниз: вертикальная – Z, горизонтальные – N-S и E-W /
 Fig. 2. Example of waveforms of the earthquakes under consideration at Crimean seismic stations. The components of the record from top to bottom are: vertical – Z, horizontal – N-S and E-W

Амплитудные спектры поперечных волн (S) рассчитывались отдельно по записям двух горизонтальных составляющих (N-S) и (E-W) и окончательная спектральная

плотность для расчета динамических параметров вычислялась как полный вектор колебаний, а продольных (P) – по вертикальной компоненте (Z). Наибольшее количество спектров получено по записям S -волн. Интерпретация спектров и оценка динамических параметров очагов выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [Brune, 1970] по методике [Аптекман и др., 1989; Пустовитенко, Пантелеева, 1990].

Рассчитанные амплитудные спектры землетрясений (рис. 3) уверенно аппроксимированы параметрами теоретической модели (ω^{-2}): спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ в низкочастотной части амплитудного спектра при $f \rightarrow 0$, точкой излома спектра – угловой частотой f_0 (ω_0) и резким спадом амплитуд спектра по квадратичному закону, т.е. с углом наклона $\gamma \sim -2$ (рис. 3).

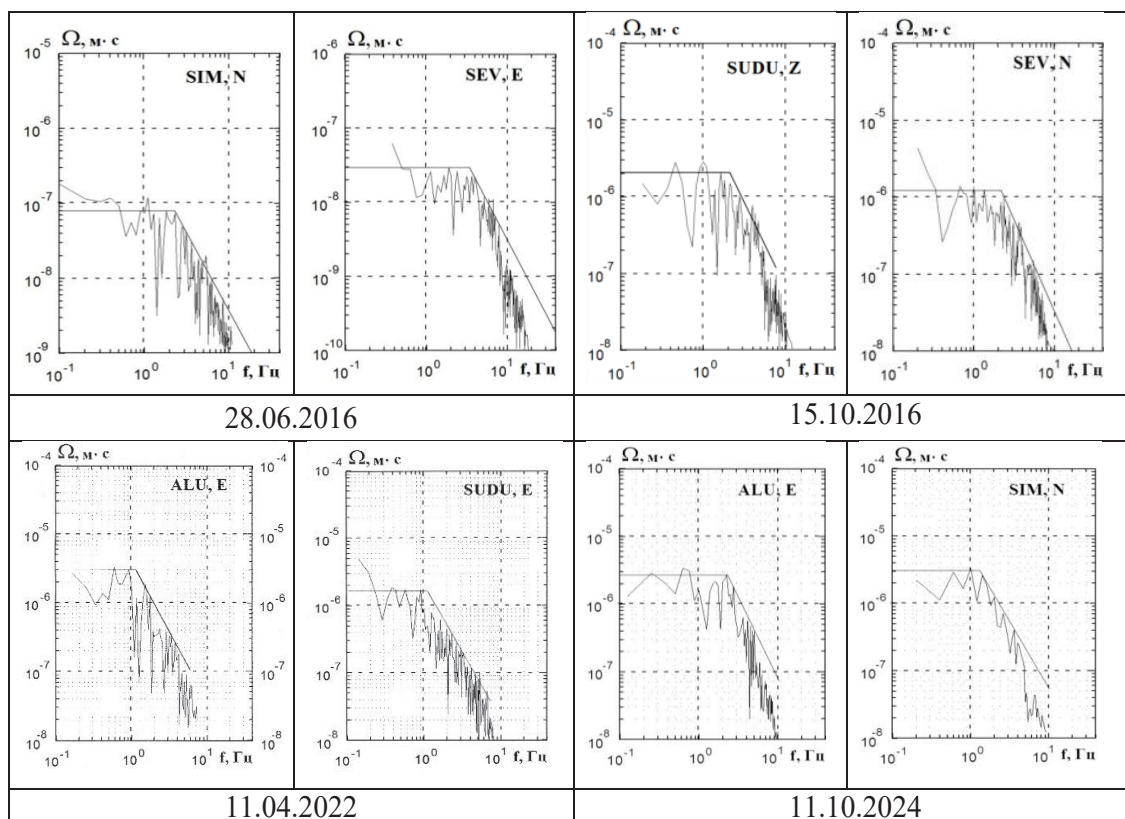


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров S -волн землетрясений по таблице 1, рассчитанных по записям сейсмостанций Крыма и их аппроксимация (прямые линии) в рамках модели ω^{-2} /

Fig. 3. Examples of amplitude spectra of S -waves of earthquakes according to Table 1, calculated from records of Crimean seismic stations and their approximation (straight lines) within the ω^{-2} model

Согласно модели Бруна [Brune, 1970], модифицированной Хэнксом и Виссом [Hanks, Wyss, 1972], спектральная плотность Ω_0 пропорциональна сейсмическому моменту M_0 – энергии, затраченной на перемещение крыльев разрыва относительно друг друга на среднюю величину дислокации, преодолев силу трения, а угловая частота f_0 связана с размером разрыва, представленного в виде круга с радиусом дислокации r_0 :

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

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

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

Параметры моделей глубинной среды в очаговой зоне землетрясения и на пути распространения сейсмических волн подбирались по работе [Starostenko et al., 2004] в соответствии с пространственным расположением его гипоцентра. Поправка $R_{\theta\phi}$ рассчитана из данных решения механизма очагов.

По значениям сейсмического момента M_0 и размера разрыва r_0 определены также другие динамические параметры очага: средние величины напряжений в очаге (сброшенное $\Delta\sigma$ и кажущееся $\eta\sigma$), средняя подвижка по разрыву \bar{U} , энергия образования дислокации E_U , упругая деформация сдвига в окрестности очага e и величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$ по формулам из работ [Аптекман и др., 1989; Кейлис-Борок, 1959; Костров, 1975; Пустовитенко, Пантелеева, 1990]:

$$\Delta\sigma = \frac{7M_0}{16r_0^3} \quad \eta\sigma = \frac{\mu \cdot E_S}{M_0} \quad \bar{U} = \frac{M_0}{\mu \cdot \pi r_0^2} \quad E_U = \frac{1}{2} \Delta\sigma \bar{U} \cdot \pi r_0^2 \quad \varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{\mu}$$

$$\Delta\sigma_r = 1/2 \Delta\sigma - \eta\sigma$$

где μ – модуль сдвига; η – сейсмический коэффициент полезного действия; E_S – сейсмическая энергия источника.

По оценкам скалярных сейсмических моментов M_0 рассчитана моментная магнитуда M_w с использованием формулы [Hanks, Kanamori, 1979]:

$$M_w = 2/3 \times (\lg M_0 + 7) - 10.7,$$

где M_0 имеет размерность $\text{Н} \times \text{м}$.

Дополнительно также проведена оценка той части полной энергии, затраченной на деформацию среды в очаговых зонах землетрясений (M_0), которая была выделена в виде сейсмических колебаний (E_S) и израсходована на дислокацию (E_U), т.е. приведенной сейсмической и дислокационной энергии e и d по соотношениям:

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

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

где E_S в Дж, M_0 в $\text{Н} \times \text{м}$.

Обсуждение результатов

Кинематические параметры очагов. В результате решения фокальных механизмов землетрясений получены параметры двух возможных поверхностей разрыва (нодальных плоскостей $NP1$ и $NP2$) и ориентации осей главных напряжений, под действием которых произошла подвижка (дислокация) в очаге: растяжения T , промежуточного N и сжатия P . Результаты решения механизмов очагов в рамках двойного диполя (doubleCouple) и методом (ТСМ) приведены в таблице 2 (в общепринятых международных форматах), а их стереограммы в нижней полусфере – на рисунке 4.

Как следует из таблицы 2 и рисунка 4, все рассмотренные землетрясения, как по данным решений (doubleCouple), так и ТСМ, произошли в обстановке горизонтальных сил сжатия с преобладанием взбросовой подвижки в очагах преимущественно близдиагональной ориентации плоскостей разрыва.

Таблица 2 / Table 2

Параметры механизмов очагов землетрясений за 2016–2024 гг. юга Западно-Черноморской впадины / Parameters of earthquake source mechanisms for 2016-2024 in the south of the Western Black Sea Basin

№	Дата/ Date	Оси главных напряжений / axes of the main stresses						Нодальные плоскости / nodal planes						Источник / source
		T		N		P		NP1			NP2			
		AZM	PL	AZM	PL	AZM	PL	STK	DP	SLIP	STK	DP	SLIP	
1	2016. 06.28	325	81	66	2	156	9	65	54	88	248	36	93	[Пустовитенко и др., 2022 / Pustovitenko et al., 2022]
2	2016. 10.15	335	88	236	0	146	2	56	47	91	236	43	89	(ISC, NEIC)
		219	72	92	11	360	14	75	33	70	279	60	103	(ISC, GCMT)
3	2022. 04.11	178	64	337	25	71	8	320	58	60	187	43	128	[Пустовитенко и др., 2023 / Pustovitenko et al., 2023]
		208	77	12	15	105	3	4	49	74	208	44	109	(ISC, GCMT)
4	2024. 10.11	98	60	278	30	8	0	252	52	51	125	52	129	Наст. статья / this article
		242	83	39	6	130	3	34	48	82	226	43	99	(ISC, GCMT)

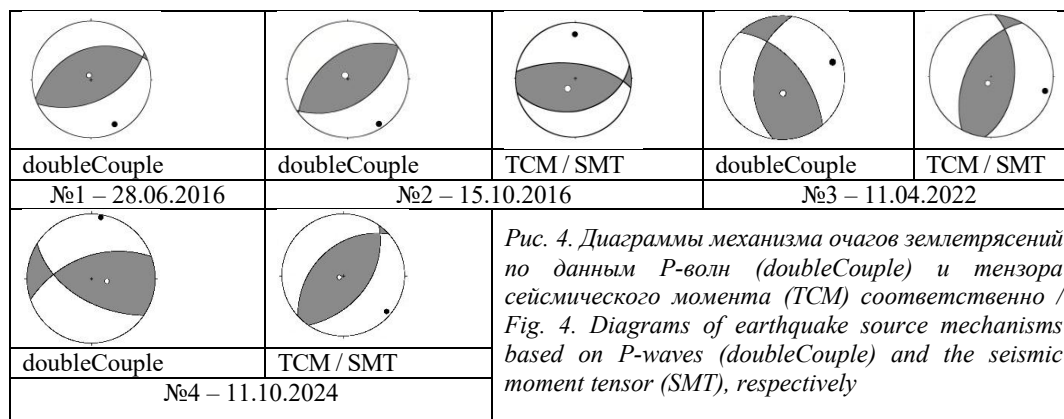


Рис. 4. Диаграммы механизма очагов землетрясений по данным P-волн (doubleCouple) и тензора сейсмического момента (TCM) соответственно / Fig. 4. Diagrams of earthquake source mechanisms based on P-waves (doubleCouple) and the seismic moment tensor (SMT), respectively

Несмотря на однотипность поля напряжений, под действием которого возникли все землетрясения, их фокальные механизмы имели отличительные особенности. Так, если во время землетрясений 2016 г. (№1 и №2) произошел чистый взброс по наклонным диагональным плоскостям, то очаги 2022 г. и 2024 г. (№3 и №4) относятся к взбросо-сдвиговому типу подвижки с преобладанием взброса над сдвигом (косой взброс с правосторонней компонентой смещения).

По данным TCM в момент максимального разрушения среды произошло изменение направления первичного поля напряжений на угол от 26° до 50° без изменения кинематического типа движений. Эти изменения могут быть связаны как с возможными допустимыми погрешностями в определении фокального механизма разными методами, так и с реальной трансформацией полей напряжений в процессе сложного вспарывания разрывов, что наиболее вероятно, поскольку все решения относятся к надежным.

Следует также отметить, что надежность восстановления фокальных механизмов по первым вступлениям P-волн (doubleCouple), подтверждается тем фактом, что на

стереограммах механизмов очагов положения сейсмостанций Крыма оказались вблизи нодальных плоскостей, вдоль которых излучение P -волн минимальное, а S -волн – максимальное. Это хорошо видно на записях (см. рис. 2). Так при землетрясениях 2016 г. амплитуды P -волн на станциях ALU, YAL с трудом видны на фоне помех, а отношение амплитуд A_s/A_p для всех станций в несколько раз превосходило среднее региональное значение $A_s/A_p=4$.

Динамические параметры очагов получены по группе станционных определений (n) с учетом логнормального закона распределения величин [Пуствовитенко, Пантелеева, 1990]. В таблице 3 представлены их средние значения (S) и стандартные отклонения (δS).

Таблица 3 / Table 3

Динамические параметры очагов землетрясений юга Западно-Черноморской впадины за 2016–2024 гг. / Dynamic parameters of earthquake foci in the south of the Western Black Sea Basin for 2016–2024

№ по табл. 1 / No. in Table 1	Дата / Date	п данных / data	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м/Н·м	r_0 , км/км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Па / Pa	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\dot{u} \cdot 10^{-2}$, м/м	$\eta\sigma \cdot 10^5$, Па/ Pa	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, Па/ Pa	$E_0 \cdot 10^8$, Джс / J	M_w^*	$e \cdot 10^{-5}$	$d \cdot 10^{-5}$	d/e
1	28.06.2016	7	182.4	0.73	20.7	34.5	1.83	7.4	0.3	314	4.11	4.35	1.75	0.4
	δS		0.07	0.02	0.07	0.07	0.06	0.07		0.13	0.1			
2	15.10.2016	4	4769	1.18	125.6	418.3	36.1	12.6	50	99740	5.06	26.4	20.9	0.8
	δS		0.16	0.02	0.14	0.14	0.14	0.16		0.29	0.2			
3	11.04.2022	7	842	1.1	28	93.1	7.44	6.34	7.7	3928	4.55	11.47	4.66	0.41
	δS		0.06	0.01	0.05	0.05	0.05	0.06		0.1	0.09			
4	11.10.2024	7	2991	0.82	223	743	45	21	91	106114	4.91	24·10	35.5	1.47
	δS		0.017	0.005	0.02	0.02	0.02	0.01		0.03	0.02			

Примечание: жирным шрифтом выделены средние значения величин S /
Note: the average values of S are highlighted in bold.

Станционные параметры радиационного трения $\Delta\sigma_r$ получились знакопеременными, поэтому их среднее значение вычислено по S для данного очага напряжения $\Delta\sigma$ и $\eta\sigma$ без оценки δS . Среднее значение M_w определено как среднее арифметическое (M_w^*) с соответствующей погрешностью. Для всех землетрясений динамические параметры получены по группе независимых станционных определений ($n \geq 4$) и с учетом реальной направленности излучения сейсмической энергии из источника на каждую станцию регистрации ($R_{0\phi}$). Это нивелировало индивидуальные станционные особенности записей сейсмических колебаний на станциях регистрации, расположенных в разных инженерно-геологических условиях, оснащенных различающейся сейсмической аппаратурой и обеспечило достаточно высокую точность и надежность результатов. Наилучшая сходимость станционных определений получена для радиуса круговой дислокации преимущественно при стандартном отклонении δS $r_0 \leq 0.02$.

Наибольшие значения сейсмического момента M_0 и радиуса дислокации r_0 получены для землетрясения 15.10.2016 г. с $M_w=5.1$, а наименьшие – для 28.06.2016 г. с $M_w=4.1$. В целом с ростом энергетического уровня землетрясений количественные значения динамических параметров очагов увеличивались в пределах разброса измеряемых величин. Радиационное трение $\Delta\sigma_r$ для исследованных землетрясений имело положительное значение, что в соответствии с [Костров, 1975] указывает на гладкое

скольжение разрыва в очагах за счет равномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах.

Сравним полученные средние значения основных очаговых параметров: M_0 , r_0 и $\Delta\sigma$ исследованных землетрясений (рис. 5) с установленными для всего региона долговременными соотношениями: $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$, $\Delta\sigma(K_{II})$, уравнения которых приведены в работе [Пустовитенко и др., 2022].

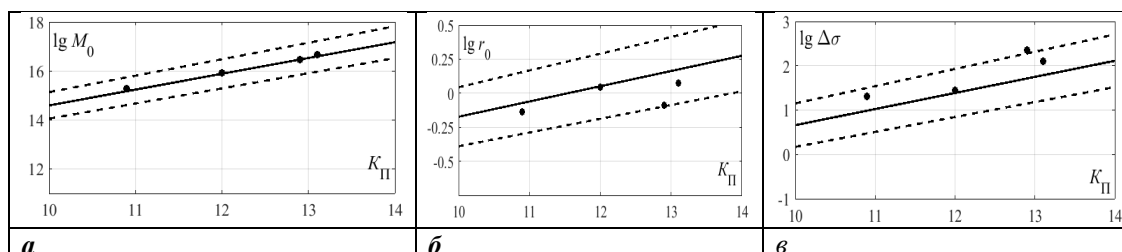


Рис. 5. Сравнение средних динамических параметров очагов землетрясений:

a – сейсмического момента M_0 , **б** – радиуса круговой дислокации r_0 и **в** – сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$. Пунктир – пределы погрешностей долговременных зависимостей /

Fig. 5. Comparison of the average dynamic parameters of earthquake foci: **a** – seismic moment M_0 , **b** – circular dislocation radius r_0 , and **c** – released stress $\Delta\sigma$ with long-term dependencies $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$, and $\Delta\sigma(K_{II})$. The dotted lines indicate the error limits of the long-term dependencies

Наглядно видно (рис. 5), что численные значения основных очаговых параметров M_0 , r_0 и $\Delta\sigma$ исследованных землетрясений соответствуют долговременным значениям по корреляционным связям $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$, находясь в диапазоне их доверительного интервала. Поскольку эти очаговые параметры определены с высокой точностью, то их вариации внутри интервала погрешностей $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$ можно отнести к природным, связанным с индивидуальными особенностями свойств глубинной среды и физических процессов в отдельных очаговых зонах. Так дислокация в очаге землетрясения 11.10.2024 г. произошла на сравнительно малой площади разрыва с заниженным радиусом r_0 (рис. 5б) при повышенном сброшенном напряжении $\Delta\sigma$ (рис. 5в). Для этого землетрясения получены также завышенные значения величины подвижки по разрыву \bar{U} , деформации сдвига e , а также энергии дислокации в очаге E_u для данного энергетического уровня (табл. 3). Соответственно доля полной энергии деформации среды, потраченной на дислокацию в очаге (**d**) этого землетрясения превысила долю сейсмической энергии e , излученной в виде сейсмических колебаний почти в полтора раза ($d/e=1.47$). Для остальных землетрясений соотношение дислокационной и сейсмической энергии было обратным, т.е. большая часть общей очаговой энергии перешла в сейсмические колебания: $d/e=0.4-0.8$ (табл. 3). Общий диапазон приведенной сейсмической энергии e для рассмотренных землетрясений составил $e=4.4 \cdot 10^{-5}-26.4 \cdot 10^{-5}$, что по классификации [Кочарян, 2016] соответствует «нормальным» сейсмическим событиям.

ВЫВОДЫ

Комплексное исследование очагов наиболее сильных землетрясений с $M_w=4.1-5.1$ южной части Западно-Черноморской впадины за последние 10 лет позволило установить их общие свойства и особенности.

1. Все рассмотренные землетрясения произошли под воздействием сжимающих напряжений в ограниченной области литосферы зоны крупного разлома мантийного заложения, пересекающего Западно-Черноморскую впадину диагонально с юга-запада на северо-восток. В очагах землетрясений возникли взбросовые и

взбросо-сдвиговые подвижки также преимущественно диагональной ориентировки с максимальным излучением энергии поперечных сейсмических волн на побережье Крыма. В процессе максимального разрушения среды (в гипоцентре центроида) произошло изменение направления первичного поля напряжений сжатия на 26–50 градусов без изменения кинематического типа движений по тектоническим разрывам.

2. Средние значения динамических параметров очагов, определенные с малой дисперсией ошибок, не противоречат долговременным статистическим значениям для данных уровней энергии и могут быть использованы в задачах инженерной сейсмологии.

3. Установленные общие свойства очаговых параметров рассмотренных землетрясений могут служить основой для создания моделей прогнозных очагов сильных землетрясений в южной части Западно-Черноморской впадины, а также для уточнения общей модели сейсмогенерирующих структур (зон ВОЗ) Крымско-Черноморского региона и последующей разработки карт ОСР нового поколения в инженерных терминах [Аптикаев, 2021].

Литература

1. 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.
2. Аптикаев Ф.Ф. О картах ОСР в ускорениях. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021 – Т. 11. № 1. – С. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008.
3. 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.
4. Введенская А.В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. – 136 с.
5. Геология шельфа УССР. Тектоника. / Гл. ред. Е.Ф. Шнюков. – Киев: Наукова Думка, 1987 – 152 с.
6. Землетрясения в СССР в 1985 году. / Отв. ред. Н.В. Кондорская. – М.: Наука, 1988. 349 с.
7. Калинин И.В., Свидлова В.С., Бондарь М.Н., Бойко В.А. Сейсмичность Крыма в 2022 году. // *Ученые записки Крымского федерального университета им В.И. Вернадского. География. Геология*. – 2023. – Т. 9(75). № 4. – С. 124–138.
8. Кейлис-Борок В.И. Исследование источников, приближенно эквивалентных очагам землетрясений. // *Труды Геофизического Института АН СССР*. – 1959. – № 9(136). – С. 20–42.
9. Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. – 176 с.
10. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. М: ГЕОС, 2016. – 424 с.
11. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
12. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона в 2016–2017 гг. // *Землетрясения Северной Евразии*. – 2022. – Вып. 25 (2016–2017). – С. 242–252. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22.
13. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма 2022 года. // *Ученые записки Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского. География. Геология*. – 2023. – Т. 9(75). № 4. – С. 138–155.
14. Свидлова В.А., Сыкчина З.Н., Бондарь М.Н., Бойко В.А. Сейсмичность Крыма в 2016 году. // *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «География»*. – 2017. – Т. 3(69). №4. – С. 7–50.

15. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. // *Journal of Geophysical Research*. – 1970. – Vol. 75. No. 26. – pp. 4997–5009.
16. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquakes source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity. // *Journal of Geophysical Research*. – 1981. – Vol. 86. – pp. 2825–2852.
17. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale. // *Journal of Geophysical Research*. – 1979. – Vol. 84. No. B5. – pp. 2348–2350.
18. Hanks T.C., Wyss M. The use of body wave spectra in the determination of seismic source parameters. // *Bulletin of the Seismological Society of America*. – 1972. – Vol. 62. No. 2. – pp. 561–589.
19. Kennet B.L.N. *Seismological Tables: ak135*. // Research School of Earth Sciences. Australian National University. Australia, Canberra, ACT0200, 2005. – 290 p.
20. Starostenko V., Buryanov V., Makarenko I. et al. Topography of the crust–mantle boundary beneath the Black Sea Basin. // *Tectonophysics*. – 2004. – Vol. 381. – pp. 211–233.

References

1. Aptekman Zh.Ya., Belavina Yu.F., Zakharova A.I., Zobin V.M., Kogan S.Ya., Korchagina O.A., Moskvina A.G., Polikarpova L.A., Chepkunas L.S. P-wave spectra in determining the dynamic parameters of earthquake foci. Transition from a station spectrum to a focal spectrum and calculation of the dynamic parameters of a focal zone. *Volcanology and Seismology*. 1989. No. 2. pp. 66–79. (In Russ.)
2. Aptikaev F.F. About GSZ maps in acceleration units. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2021. Vol. 11. No. 1. pp. 95–103. DOI: 10.46698/VNC.2021.24.94.008. (In Russ.)
3. Balakina L.A., Vvedenskaya A.V., Golubeva N.V., Misharina L.A., Shirokova E.I. The Earth's elastic stress field and focal mechanism. Moscow. Nauka. 1972. 198 p. (In Russ.)
4. Vvedenskaya A.V. *Studies of stresses and ruptures in earthquake foci using dislocation theory*. Moscow. Nauka. 1969. 136 p. (In Russ.)
5. *Geology of the shelf of the Ukrainian SSR. Tectonics*. Ed. E.F. Shnyukov. Kiev. Naukova Dumka. 1987. 152 p. (In Russ.)
6. *Earthquakes in the USSR in 1985*. Ed. N.V. Kondorskaya. Moscow. Nauka. 1988. 349 p. (In Russ.)
7. Kalinyuk I.V., Svidlova V.S., Bondar M.N., Boyko V.A. Seismicity of Crimea in 2022. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2023. Vol. 9(75). No. 4. pp. 124–138. (In Russ.)
8. Keilis-Borok V.I. Study of sources approximately equivalent to earthquake foci. *Proceedings of the Geophysical Institute of the USSR Academy of Sciences*. 1959. No. 9(136). pp. 20–42. (In Russ.)
9. Kostrov B.V. *Focal mechanism of a tectonic earthquake*. Moscow. Nauka. 1975. 176 p. (In Russ.)
10. Kocharyan G.G. *Geomechanics of Faults*. Moscow. GEOS. 2016. 424 p. (In Russ.)
11. Pustovitenko B.G., Panteleeva T.A. *Spectral and focal parameters of earthquakes in Crimea*. Kiev. Naukova Dumka. 1990. 251 p. (In Russ.)
12. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E., Bondar M.N. Focal parameters of earthquakes in the Crimean-Black Sea region in 2016–2017. *Earthquakes of Northern Eurasia*. 2022. Issue 25 (2016–2017). pp. 242–252. DOI: 10.35540/1818-6254.2022.25.22. (In Russ.)
13. Pustovitenko B.G., Eredzhepov E.E., Bondar M.N. Spectral and focal parameters of earthquakes in Crimea in 2022. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology*. 2023. Vol. 9(75). No. 4. pp. 138–155. (In Russ.)
14. Svidlova V.A., Sykchina Z.N., Bondar M.N., Boyko V.A. Seismicity of Crimea in 2016. *Scientific Notes of the V.I. Vernadsky Taurida National University. Series Geography*. 2017. Vol. 3(69). No. 4. pp. 7–50. (In Russ.)

15. Brune I.V. Tectonic stress and the spectrum of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of Geophysical Research*. 1970. Vol. 75. No. 26. pp. 4997–5009.
16. Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquakes source parameters from wave-form data for studies of global and regional seismicity. *Journal of Geophysical Research*. 1981. Vol. 86. pp. 2825–2852.
17. Hanks T.C., Kanamori H. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*. 1979. Vol. 84. No. B5. pp. 2348–2350.
18. Hanks T.C., Wyss M. The use of body wave spectrum in the determination of seismic source parameters. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1972. Vol. 62. No. 2. pp. 561–589.
19. Kennet B.L.N. *Seismological Tables: ak135*. Research School of Earth Sciences. Australian National University. Australia. Canberra. ACT0200. 2005. 290 p.
20. Starostenko V., Buryanov V., Makarenko I. et al. Topography of the crust–mantle boundary beneath the Black Sea Basin. *Tectonophysics*. 2004. Vol. 381. pp. 211–233.