

РАЗДЕЛ 5.
ГЕОФИЗИКА И СЕЙСМОЛОГИЯ

УДК 550.348.435

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

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

^{1,2,3}ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства», Симферополь, Республика Крым, Россия.

³Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия.

E-mail: ¹bpustovitenko@mail.ru

Представлены результаты изучения и анализа общих свойств и особенностей спектральных, кинематических, динамических и энергетических характеристик очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2023 год. Для 9 землетрясений по амплитудным спектрам объемных сейсмических волн решена обратная задача по восстановлению динамические параметры очагов (M_0 , ρ_0 , $\Delta\sigma$, ϵ , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma$, \bar{u} , E_u и M_w) с использованием теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}). Для двух наиболее сильных землетрясения 27 февраля с $M_w=3.8$ и 22 июня с $M_w=4.8$ получены кинематические параметры очагов в рамках дислокационной модели двойного диполя. Спектральные свойства сейсмических волн 7 землетрясений исследованы по энергетическим спектрам с использованием сейсмограмм станции «Алушта».

Ключевые слова: механизм очага, амплитудный спектр, модель Бруна, спектральная плотность, угловая частота, динамические параметры очага, энергетический спектр, система спектров.

ВВЕДЕНИЕ

Для проведения работ по оценке и картированию сейсмической опасности территории в различных масштабах, а также моделирования прогнозных сейсмических воздействий необходимы надежные знания о параметрах моделей очагов землетрясений, возникающих в сложных многопараметрических сеймотектонических структурах региона — зонах возможных очагов землетрясений (зонах ВОЗ). Эти модели конструируются на основе экспериментальных данных, в том числе с использованием кинематических и динамических параметров очагов, восстанавливаемых по волновым формам сейсмических волн, зарегистрированных группой сейсмических станций. При этом надежность построения моделей очагов зависит от статистически значимых исходных данных, полученных в широком энергетическом диапазоне за длительный интервал времени. В связи с этим постоянное пополнение банка данных об очаговых параметрах местных землетрясений является крайне необходимой и актуальной задачей, особенно для Крымского региона с низким уровнем сейсмической активности, но высоким сейсмическим потенциалом геологических структур [1].

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Кинематические параметры очагов землетрясений восстанавливаются из фокальных механизмов, надежные решения которых можно получить только для наиболее сильных землетрясений по записям большого количества сейсмических станций, окружающих очаг равномерно со всех сторон. Для решения **механизмов** очагов двух наиболее сильных землетрясений 27 февраля и 22 июня 2023 года использованы знаки первых вступлений продольных сейсмических волн, зарегистрированные на 126 сейсмических станциях, 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] были собраны и использованы исходные материалы по ближайшим станциям, расположенным вокруг бассейна Черного моря.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений изучены по 83 амплитудным спектрам продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных на шести региональных сейсмических станциях Института сейсмологии и геодинамики КФУ (ИГиС КФУ): «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Керчь» (KERU) и двух автономных ГАУ «Крымский Республиканский Центр оценки сейсмической и оползневой опасности, технического обследования объектов строительства» (ГАУ «КРЦ»): «Донузлав-2» (DNZ2) и «Опук» (OPUK). Для изучения спектральные свойств сейсмических колебаний, на которые приходится максимальный уровень излученной из очага энергии, использовано 19 энергетических спектров объемных сейсмических волн по сейсмограммам станции «Алушта».

Всего для оценки очаговых параметров местных землетрясений за 2023 год отобраны записи девяти сейсмических событий в диапазоне энергетических классов $K_{\Pi} = 7.5 \div 12.5$ (табл. 1), представляющих научный интерес с позиции их пространственного расположения и энергетического уровня (рис. 1).

Таблица 1.

Основные параметры землетрясений Крыма за 2023 год, для которых
восстановлены динамические характеристики очагов

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	Магнитуда		K_{Π}	Район
			φ° , N	λ° , E		M_w/h , табл. 4	ML wsg		
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>
1	25.01	16 31 58.6	44.63	36.21	29	2.76/3	2.4	8.2	Керченско-Анапский (№ 5)
2*	27.02	13 02 38.7	44.53	34.45	28	3.8/7	3.5	11.1	Алуштинский (№ 3)
3	09.03	16 03 57.9	44.02	33.39	29	2.18/2	2.1	7.6	Севастопольский (№ 1)
4	10.03	14 43 53.1	44.00	33.36	27	3.13/4	2.6	8.6	Севастопольский (№ 1)
5	21.03	03 01 46.8	45.18	33.79	6	2.25/10	1.9	7.5	Степной Крым (№ 6)
6	20.06	09 37 21.0	44.66	36.35	24	3.24/4	2.7	8.9	Керченско-Анапский (№ 5)
7*	22.06	02 42 28.7	44.05	33.45	39	4.77/12	5.0	12.5	Севастопольский (№ 1)
8	18.07	11 03 18.1	44.45	35.99	20	3.54/7	3.3	9.6	Судакско-Феодосийский (№ 4)
9	15.08	12 11 05.4	44.41	34.32	22	3.0/6	2.6	8.7	Ялтинский (№ 2)

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–6, 8–10 даны по данным сводной обработки в Крыму, значения M_w — из табл.4, n — число станционных определений, *— землетрясения, для которых получено решение механизма очага.

Большинство выбранных для оценки очаговых параметров землетрясений произошло в акватории Черного моря (рис.1), в основных сеймотектонических структурах Крымского региона на глубинах от 20км до 39км в диапазоне эпицентральных расстояний $\Delta=16\div 276$ км от сейсмических станций. Только одно относительно слабое событие с $K_p=7.5$ возникло в верхнем слое земной коры ($h=6$ км) материковой части Крыма (район №6, Степной Крым). Очаг самого сильного ощутимого землетрясения 22 июня 2023 г. с $K_p=12.5$ приурочен к переходной зоне кора-мантия ($h=39$ км) места сочленения крупных сейсмолинеаментов: Одесско-Синопского и Южнобережного [1]. Другое ощутимое землетрясение 27 февраля ($K_p=11.1$) с интенсивность до 3 баллов в нескольких населенных пунктах ЮБК [3] произошло вблизи побережья Крыма в зоне пересечения Салгиро-Октябрьского глубинного разлома (Альминская структура [1]) и Южнобережного.

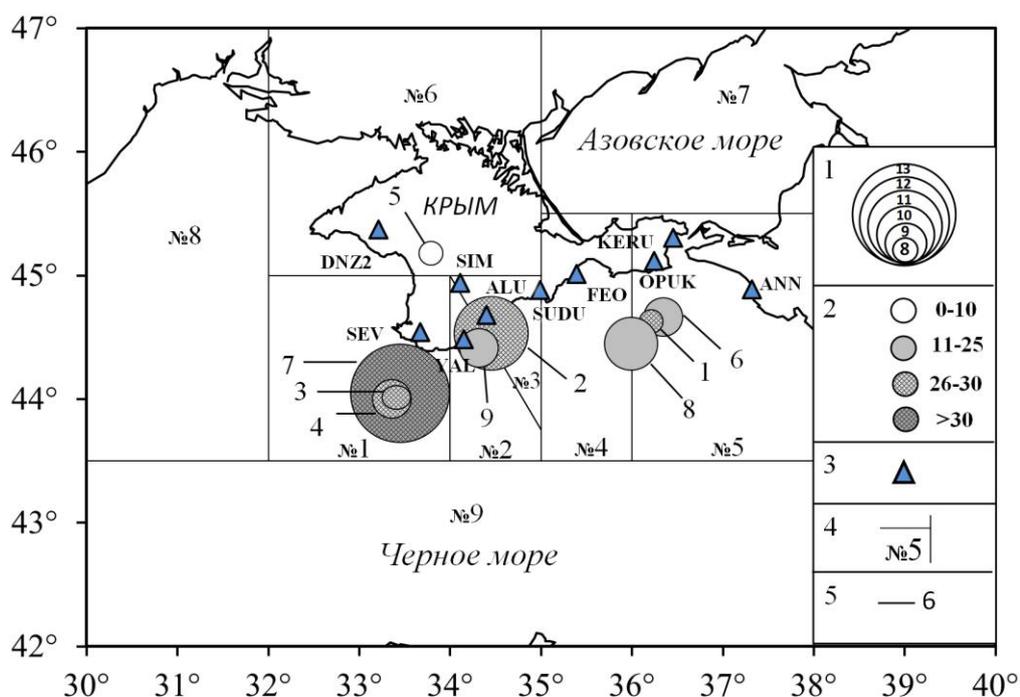


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2023 г., для которых восстановлены очаговые параметры: 1 — энергетический класс K_p [4]; 2 — глубина очага; 3 — сейсмическая станции; 4 — граница сейсмоактивных районов; 5 — номера землетрясений по табл. 1.

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

Для расчета амплитудных и энергетических спектров отобраны только стационарные сейсмограммы, отвечающие критериям высокого качества: четкие (*i*) моменты вступления объемных волн, амплитуды полезного сигнала в 2 и более раза превышают фон помех. Пример использованной в работе сейсмограммы дан на рисунке 2.

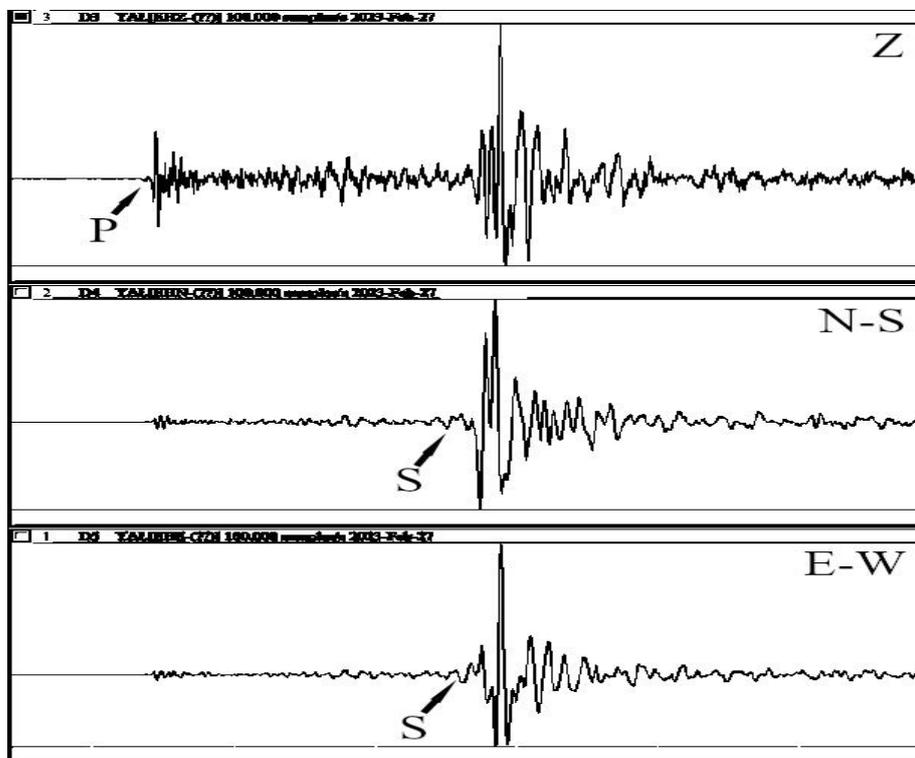


Рис. 2. Пример записи землетрясения 27 февраля 2023 г. на сейсмической станции «Ялта», $K_p=11.1$, $\Delta=24$ км. Стрелками отмечены моменты вступления продольных (*P*) и поперечных (*S*) волн.

Спектральные свойства семи слабых толчков с $K_p=5.0\div 7.4$, как и в предыдущие годы [5, 6], изучены также по спектрам энергии объемных сейсмических волн, зарегистрированных на станции «Алушта» (табл. 2). Отметим, что использование только одной сейсмической станции дает возможность минимизировать особенности стационарных условий регистрации.

Для анализа выбрана компактная группа землетрясений («рой» по принятой классификации [7]), произошедших в конце ноября 2023г. в центральной зоне региона (Алуштинский район) вблизи станции «Алушта» (№ 2–7 в табл. 2). Эти группирующие события принадлежат одному локализованному объему геологической структуры, в связи с этим физические свойства глубинной среды в самой очаговой зоне и на пути распространения сейсмических волн можно считать

квазиоднородными, мало влияющими на характер и свойства сейсмических колебаний, а значит и на параметры расчетных спектров.

Кроме того, дополнительно рассчитан энергетический спектр землетрясения 21 марта (№1 в табл.2), произошедшего в мало изученной материковой части Крыма (Степной Крым, №5 на рис. 1).

Таблица 2.

Основные параметры землетрясений Крыма за 2023 год, для которых рассчитаны энергетические спектры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	$K_{п}$	Район
			φ° , N	λ° , E			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	21.03	03 01 46.8	45.18	33.79	6	7.5	Степной Крым (№ 6)
2	25 10	15 35 18.0	44.54	34.70	13	6.2	Алуштинский (№ 3)
3	25 10	23 42 05.6	44.51	34.70	13	5.0	Алуштинский (№ 3)
4	26 10	03 07 12.9	44.57	34.64	13	5.2	Алуштинский (№ 3)
5	26 10	04 52 56.3	44.66	34.65	15	7.2	Алуштинский (№ 3)
6	27 10	13 40 13.4	44.67	34.65	16	6.5	Алуштинский (№ 3)
7	27 10	14 08 47.0	44.64	34.64	19	7.4	Алуштинский (№ 3)

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Решение механизма очагов выполнено в рамках теоретической дислокационной модели сдвигового источника в виде двойного диполя по активной тектонической структуре [8] с использованием методики, описанной в работе [9]. 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 [10], а для далеких — по таблицам из работы [11].

Интерпретация амплитудных спектров и оценка динамических параметров очагов выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Бруна (ω^{-2}) [12] по методике и формулам из работ [12, 13, 14, 15, 16]. Параметры моделей глубинной среды в очаговой зоне землетрясения и на пути распространения сейсмических волн подбирались в соответствии с пространственным расположением его гипоцентра.

Амплитудные спектры поперечных волн (S) рассчитывались отдельно по записям двух горизонтальных составляющих (N-S) и (E-W) и окончательная спектральная плотность вычислялась, как полный вектор колебаний (сокращенно N+E), а продольных (P) — по вертикальной компоненте (Z). Длительность τ участка записи, использованная для расчета амплитудного спектра, соответствовала времени от момента вступлений P - и S -волн до спада их максимальных амплитуд A_{\max} на уровень $1/3 A_{\max}$ [17].

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

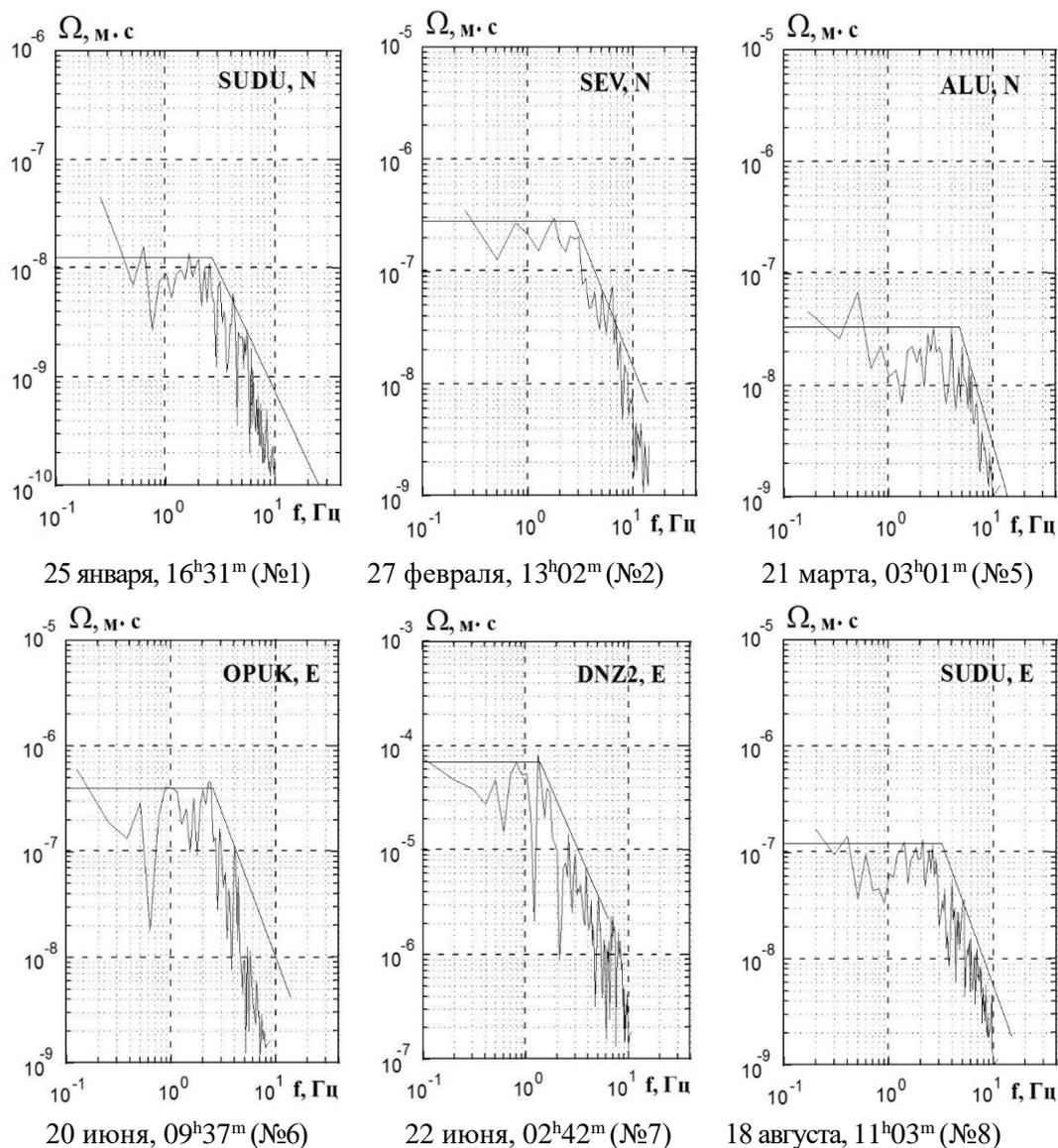


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма 2023 г. и их аппроксимация (прямые линии) в рамках использованной теоретической модели ω^{-2} .

Рассчитанные амплитудные спектры землетрясений 2023 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 $\gamma \sim 2$ (рис.3). В тех отдельных случаях, когда амплитудный спектр невозможно было

надежно интерпретировать в рамках используемой теоретической модели, он исключался из дальнейшего рассмотрения.

Для пересчета амплитудных спектров в спектры энергии использована методика и алгоритм, описанные в работах [17, 18]. Для исключения осцилляций, затрудняющих интерпретацию, энергетические спектры сглаживались скользящим усреднением в пределах октавной ширины по оси частот, как рекомендовано в работе [18]. Спектры представлены единообразно в билогарифмической системе координат (см. рис.7).

ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Кинематические параметры очагов землетрясений.

В результате решения механизма очагов землетрясений 27 февраля и 22 июня 2023 года в рамках двойного диполя [8, 9] получены параметры двух возможных пространственных положений поверхности разрыва (нодальные плоскости $NP1$ и $NP2$ в табл. 3), описываемые тремя величинами (в градусах): азимутом простираения STK , углом падения DP и скольжением $SLIP$. Ориентация осей трех главных напряжений, под действием которых произошла подвижка (дислокация) в очаге: растяжения T , промежуточного N и сжатия P , представлена двумя параметрами: направлением AZM и углом PL относительно дневной поверхности (табл. 3). Стереогаммы механизмов очагов в верхней полусфере приведены на рис.4.

Таблица 3.

Параметры механизма очагов землетрясений 2023 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	$SLIP$
2023 02 27	13 02 38.7	28	3.8	0	69	16	159	74	339	355	47	-68	144	47	-112
2023.06.22	22 42 28.7	39	4.8	57	296	20	60	25	160	54	73	69	287	27	140
2023.06.22 ¹	22 42 26.6	14	4.6	87	61	3	225	0.8	315	48	44	94	222	46	86
2023.06.22 ²	22 42 30.3	24	4.8	79	313	1	47	11	137	47	56	89	228	34	91
2023.06.22 ³	22 42 32.8	25	4.7	77	344	5	232	12	141	56	57	96	225	33	81
Среднее по ТСМ				81 ± 4	329 ± 11	3 ± 1	229 ± 4	8 ± 5	138 ± 2	50 ± 4	52 ± 7	93 ± 3	225 ± 2	38 ± 5	86 ± 3

Примечание: индексы ¹⁻³ — решения по методу тензора сейсмического момента (ТСМ) центра, полученные в сейсмологических агентствах [2]: 1-GFZ, 2-GCMT, 3-NEIS, соответственно. Жирным шрифтом выделены средние значения параметров фокального механизма по методу ТСМ центра.

Землетрясение 27 февраля возникло в центральной зоне региона в обстановке горизонтальных сил растяжения, ориентированных близдиагонально (рис.4а). Тип подвижки в очаге — крутой сброс по обеим равновероятным плоскостям разрыва. Одна из нодальных плоскостей $NP1$ близмеридионального простираения (вдоль

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

Салгиро-Октябрьского разлома) имела падение к востоку, другая $NP2$ ориентирована близдиагонально с падением на юго-запад. Отметим, что установленная сбросовая подвижка в очаге данного землетрясения под действием растягивающих напряжений является характерной для центральной зоны региона [19], где реализовано наиболее сильное ($M_w = 6.9$), разрушительное землетрясение 11 сентября 1927 года с подобным фокальным механизмом со сбросовой подвижкой в условиях растяжения [20].

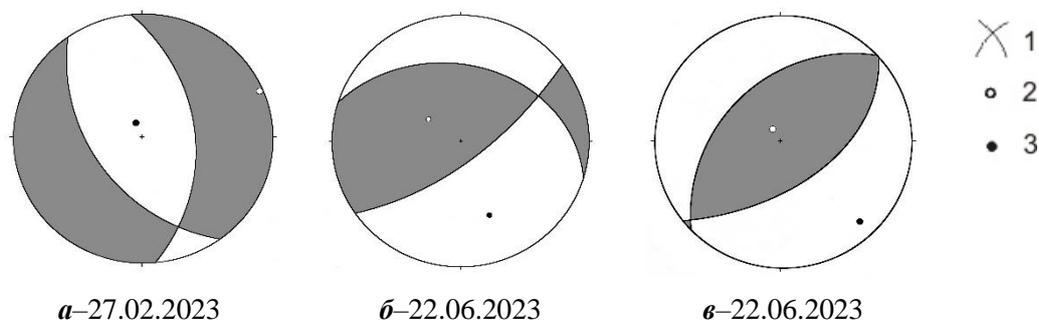


Рис. 4. Диаграммы механизма очагов землетрясений 27 февраля и 22 июня 2023 г. (№ 2 и 7 по таблице 1): **a**, **б** — решения по знакам первых вступлений P -волн, **в** — средний механизм по ТСМ. 1 — нодальные линии; 2, 3 — оси главных напряжений растяжения и сжатия соответственно; зачернена область волн сжатия.

В очаге землетрясения 22 июня произошел всброс активного крыла разрыва в обстановке сжимающих напряжений. Нодальная плоскость $NP1$ северо-восточного простирания, характеризуется крутым падением к юго-востоку, плоскость $NP2$ — близширотного простирания наклонена к северу (рис.4б).

Решение фокального механизма очага данного землетрясения выполнено также по методу тензора сейсмического момента (ТСМ) центраида в трех агенствах (табл. 2.). Результаты опубликованы в Международном сейсмологическом центре данных [2]. Все решения ТСМ близки между собой, потому на рисунке 4в приведен осредненный его механизм, представленный также взбросовой подвижкой, как и полученный нами в данной работе по знакам первых вступлений продольных волн (рис.4б). Напомним, что в рамках двойного диполя определяется механизм начала испарывания, а по ТСМ – процесса максимального разрушения в очаговой зоне.

По данным всех решений к наиболее вероятной рабочей плоскости дислокации в очаге можно отнести $NP1$ с близкими азимутами простирания: $STK=54^\circ$ по знакам первых вступлений P -волн и $STK=50\pm 4^\circ$ по методу ТСМ (табл.3).

Это предположение подтверждается и пространственно-временным распределением повторных слабых толчков (рис. 5), отражающим развитие процесса снятия напряжений в области очага. Прежде всего, можно видеть (рис.5а), что очаговая зона землетрясения вытянута вдоль оси $L-L_1$, ориентированной в азимуте $Az\approx 50^\circ$, как и нодальная плоскость $NP1$ (табл. 3). При этом глубины очагов от начального гипоцентра с $h=39\text{ км}$ при повторных толчках уменьшились до $h=34\text{ км}$

(рис. 5б), т.е. процесс разрушения сплошности среды в очаговой зоне шел снизу в ее верхние слои (рис. 5а), распространяясь от начала вспарывания в юго-западном направлении. На удаление эпицентров афтершоков к юго-западу указывает также факт увеличения со временем разницы времен вступления P и S -волн на ближайшей станции «Севастополь» с $\delta t = t_p - t_s = 8.0c$ до $\delta t = 8.8c$ или эпицентральных расстояний с 58 км до 73 км.

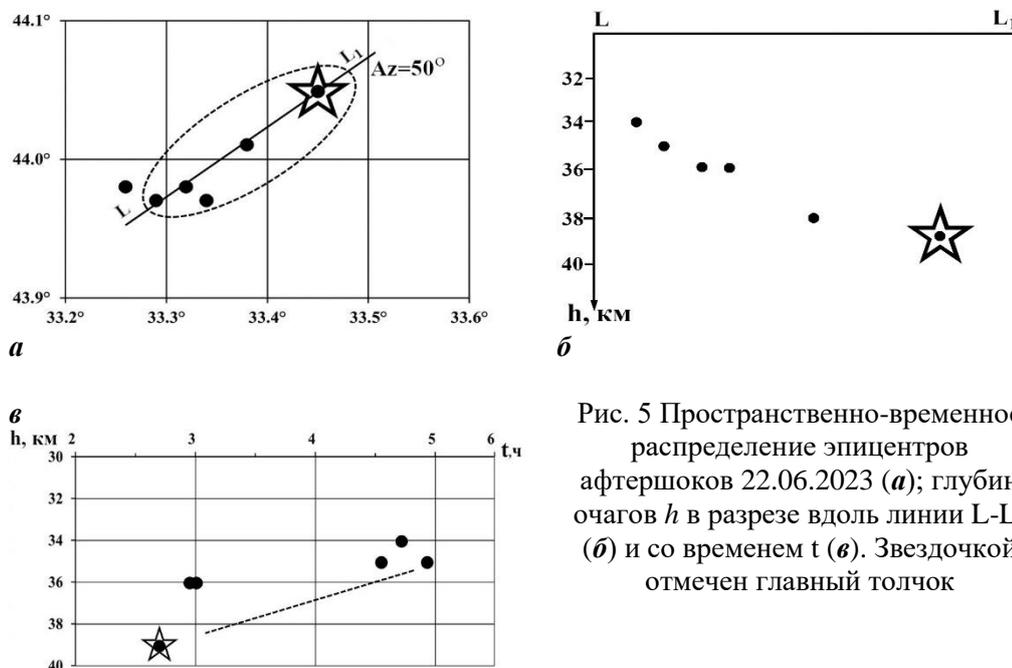


Рис. 5 Пространственно-временное распределение эпицентров афтершоков 22.06.2023 (а); глубин очагов h в разрезе вдоль линии L-L₁ (б) и со временем t (в). Звездочкой отмечен главный толчок

Динамические параметры очага.

К динамическим параметрам очагов относятся: M_0 — скалярный сейсмический момент, r_0 — радиус круговой дислокации, $\Delta\sigma$ — сброшенное напряжение, $\eta\sigma$ — кажущееся напряжение, $\Delta\sigma_t$ — радиационное трение, ε — деформация сдвига в окрестности очага, \bar{u} — средняя подвижка по разрыву, E_u — энергия образования дислокации в очаге, исходными данными для расчета которых служат две главные характеристики амплитудных спектров (рис. 3): спектральная плотность Ω_0 и угловая частота f_0 . Согласно теоретической дислокационной модели Бруна [12] спектральная плотность Ω_0 пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 , а угловая частота f_0 прямо связана с размером дислокации r_0 .

Формула для расчета M_0 по стационарному спектру имеет вид:

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

где Ω_0 — максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$, определяемая из амплитудного спектра; V — скорость распространения объемной

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

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

Характеристики модели среды подбираются исходя из места расположения гипоцентра землетрясения, поправка $R_{\theta\phi}$ — вычисляется из параметров механизма очагов или принимается средней $R_{\theta\phi} = 0.4$ для слабых толчков, когда невозможно решить фокальный механизм.

Для дислокационной модели Бруна с разрывом в виде круга, радиус дислокации r_0 вычисляется по формуле:

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

По найденным значениям сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 определены средние величины напряжений в очаге (сброшенное $\Delta\sigma$ и кажущееся $\eta\bar{\sigma}$) и средняя подвижка по разрыву \bar{U} по формулам из работ [14, 16]:

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

где μ — модуль сдвига; η — сейсмический коэффициент полезного действия; E_S — энергия источника ($\lg E_S = 1.8 + 1.5M_{LH}$).

Величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$, связанного с шероховатостью поверхности разрыва в очаге, определена по формуле из [14]:

$$\Delta\sigma_r = 1/2 \Delta\sigma - \eta\bar{\sigma}$$

Оценка энергии E_U выполнена по дислокации в очаге и сброшенному напряжению:

$$E_U = \frac{1}{2} \Delta\sigma \bar{U} \cdot \pi r_0^2$$

С использованием уравнения из теории упругости, связывающего деформацию с напряжением, оценена упругая деформация сдвига:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{\mu}$$

Моментная магнитуда M_w рассчитана по индивидуальным оценкам скалярных сейсмических моментов M_0 , с использованием формулы [15]:

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

где M_0 имеет размерность $H \cdot m$

Вычисление средних значений параметров (S) и стандартных отклонений (δS) выполнено по стационарным определениям с учетом логнормального закона распределения величин [17]. Стационарные параметры радиационного трения $\Delta\sigma_r$

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 стационарных и средних значений динамических параметров очагов приведены в таблице 4.

Таблица 4.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2023 год

Станция	Волна	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	$\sum \Omega_0 \cdot 10^{-6}$, 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	$\Delta\sigma_r \cdot 10^5$, 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
№ 1. 25 января, $t_0=16$ ч 31 мин 58.6 с; $\varphi = 44.63^\circ$, $\lambda = 36.21^\circ$; $h=29$ км; $K_{II} = 8.2$															
OPUK	P	Z	54	0.004		5.2	1.17	0.45	0.57	1.91	0.06	3.22	-2.93	0.11	2.65
OPUK	S	N+E	54		0.13	3.3	4.1	0.41	2.68	8.92	0.26	0.92	0.42	1.83	3.01
SUDU	S	N+E	100		0.016	3.2	1.06	0.42	0.63	2.09	0.06	3.58	-3.56	0.11	2.62
S — среднее значение							1.72	0.42	1	3.3	0.1	2.2	-1.7	0.28	2.76
δS — стандартное отклонение							0.19	0.01	0.22	0.22	0.21	0.19		0.41	0.17
№ 2. 27 февраля, $t_0=13$ ч 02 мин 38.7 с; $\varphi = 44.53^\circ$, $\lambda = 34.45^\circ$; $h=28$ км; $K_{II} = 11.1$															
YAL	P	Z	24	0.09		5	72.9	0.47	31.6	105	3.57	13.0	2.79	384	3.85
YAL	S	N+E	24		4.6	3	65.7	0.45	32.2	107	3.49	14.4	1.67	353	3.82
SIM	P	Z	53	0.11		4.2	76.6	0.55	19.7	65.6	2.64	12.4	-2.55	251	3.86
SIM	S	N+E	53		1.2	2.6	63.8	0.52	20.4	67.9	2.55	14.9	-4.67	217	3.81
SUDU	P	Z	59	0.25		4	67.9	0.58	15.1	50.2	2.13	14.0	-6.44	171	3.82
SEV	P	Z	61	0.04		4.5	44.5	0.52	14.1	46.9	1.76	21.3	-14.3	104	3.70
SEV	S	N+E	61		0.43	2.7	45.7	0.5	16.3	54.4	1.97	20.8	-12.6	124	3.71
S - среднее значение							61.2	0.51	20.3	67.5	2.5	15.5	-5.4	207	3.8
δS — стандартное отклонение							0.04	0.01	0.06	0.06	0.04	0.04		0.08	0.04
№ 3. 09 марта, $t_0=16$ ч 03 мин 57.9 с; $\varphi = 44.02^\circ$, $\lambda = 33.39^\circ$; $h=29$ км; $K_{II} = 7.6$															
SEV	P	Z	62	0.0008		6.5	0.19	0.36	0.18	0.6	0.016	20.1	-20	0.006	2.12
SEV	S	N+E	62		0.0075	4.5	0.29	0.3	0.48	1.59	0.035	13.1	-12.8	0.023	2.24
S — среднее значение							0.23	0.33	0.29	0.98	0.02	16.2	-16	0.01	2.18
δS — стандартное отклонение							0.09	0.04	0.21	0.21	0.17	0.09		0.29	0.06
№ 4. 10 марта, $t_0=14$ ч 43 мин 53.1 с; $\varphi = 44.00^\circ$, $\lambda = 33.36^\circ$; $h=27$ км; $K_{II} = 8.6$															
SEV	P	Z	65	0.01		5.5	3.89	0.42	2.24	7.48	0.23	2.15	-1.03	1.45	3.0
SEV	S	N+E	65		0.1	3.7	5.57	0.36	5.12	17.1	0.45	1.5	1.06	4.76	3.1
DNZ2	S	N+E	153		0.08	3.6	8.13	0.37	6.88	22.9	0.62	1.03	2.41	9.32	3.21
SUDU	S	N+E	163		0.06	3.65	7.84	0.37	6.92	23.1	0.62	10.7	2.39	9.03	3.2

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
<i>S</i> — среднее значение							6.1	0.38	4.83	16.1	0.45	2.44	-0.03	4.9	3.13
δS — стандартное отклонение							0.07	0.02	0.12	0.12	0.1	0.22		0.19	0.08
№ 5. 21 марта, $t_0=03$ ч 01 мин 46.8 с; $\varphi = 45.18^\circ$, $\lambda = 33.79^\circ$; $h = 6$ км; $K_{п} = 7.5$															
SIM	<i>P</i>	Z	36	0.0015		11	0.23	0.21	1.05	3.51	0.05	4.16	-3.64	0.04	2.18
SIM	<i>S</i>	N+E	36		0.009	6	0.22	0.22	0.88	2.93	0.05	4.24	-3.8	0.033	2.17
DNZ2	<i>P</i>	Z	50	0.001		10.5	0.24	0.22	0.95	3.17	0.05	4.0	-3.53	0.038	2.19
DNZ2	<i>S</i>	N+E	50		0.012	6.3	0.39	0.21	1.76	5.87	0.09	2.44	-1.56	0.11	2.33
SEV	<i>P</i>	Z	71	0.0004		11	0.16	0.21	0.73	2.42	0.04	6.04	-5.67	0.02	2.07
SEV	<i>S</i>	N+E	71		0.006	6.2	0.3	0.22	1.3	4.33	0.07	3.16	-2.51	0.065	2.25
ALU	<i>P</i>	Z	73	0.002		10	0.31	0.23	1.07	3.56	0.06	3.08	-2.55	0.055	2.26
ALU	<i>S</i>	N+E	73		0.03	5.5	0.88	0.24	2.67	8.89	0.16	1.07	0.26	0.39	2.57
YAL	<i>P</i>	Z	82	0.001		10.5	0.3	0.22	1.19	3.96	0.06	3.2	-2.61	0.059	2.25
YAL	<i>S</i>	N+E	82		0.0045	6.3	0.26	0.21	1.16	3.85	0.06	3.73	-3.15	0.049	2.21
<i>S</i> — среднее значение							0.29	0.22	1.19	3.97	0.06	3.24	-2.65	0.06	2.25
δS — стандартное отклонение							0.06	0.01	0.05	0.05	0.05	0.06		0.11	0.06
№ 6. 20 июня, $t_0=09$ ч 37 мин 21.0 с; $\varphi = 44.66^\circ$, $\lambda = 36.35^\circ$; $h = 24$ км; $K_{п} = 8.9$															
OPUK	<i>P</i>	Z	52	0.03		4.2	7.11	0.55	1.83	6.09	0.25	2.99	-2.07	2.16	3.17
OPUK	<i>S</i>	N+E	52		0.41	2.55	14.4	0.53	4.34	14.5	0.55	1.47	0.7	10.4	3.38
SUDU	<i>P</i>	Z	110	0.01		4.8	4.65	0.48	1.78	5.94	0.21	4.57	-3.68	1.38	3.05
SUDU	<i>S</i>	N+E	110		0.24	2.6	15.1	0.52	4.86	16.2	0.61	1.4	1.03	12.3	3.39
<i>S</i> — среднее значение							9.21	0.52	2.88	9.6	0.36	2.3	-0.86	4.42	3.24
δS — стандартное отклонение							0.12	0.01	0.12	0.12	0.12	0.12		0.24	0.14
№ 7. 22 июня, $t_0=02$ ч 42 мин 28.7 с; $\varphi = 44.05^\circ$, $\lambda = 33.45^\circ$; $h = 39$ км; $K_{п} = 12.5$															
SEV	<i>P</i>	Z	58	1.0		1.9	1480	1.20	29.8	99.4	9.35	10.2	4.71	7330	4.71
SEV	<i>S</i>	N+E	58		30	1	1410	1.42	21.7	72.4	7.46	10.7	0.18	5100	4.7
YAL	<i>P</i>	Z	74	2.0		2	1400	1.23	33.0	110	9.84	10.7	5.79	7710	4.7
YAL	<i>S</i>	N+E	74		25	1.05	2090	1.35	37.3	124	12.2	7.2	11.5	13000	4.82
SIM	<i>P</i>	Z	113	1.0		1.9	1400	1.29	28.2	94	8.85	10.8	3.33	6560	4.7
SIM	<i>S</i>	N+E	113		65	1.05	2780	1.35	49.7	166	16.3	5.4	19.5	23100	4.9
DNZ2	<i>P</i>	Z	148	30		1.8	3000	1.37	51.6	172	17.1	5.01	20.8	25800	4.92
DNZ2	<i>S</i>	N+E	148		110	1	2470	1.42	38.2	127	13.1	6.08	13.0	15700	4.87
OPUK	<i>P</i>	Z	251	0.3		1.95	1600	1.26	34.9	116	10.7	9.41	8.03	9290	4.74
OPUK	<i>S</i>	N+E	251		6	1.1	1270	1.29	26.1	87	8.14	11.8	1.21	5530	4.67
KERU	<i>P</i>	Z	276	1.0		1.85	1950	1.33	36.4	121	11.7	7.7	10.5	11800	4.8
KERU	<i>S</i>	N+E	276		10	0.97	1400	1.46	19.7	65.6	6.96	10.8	-0.93	4580	4.7
<i>S</i> — среднее значение							1775	1.33	32.6	108.6	10.56	8.48	7.82	9633	4.77
δS — стандартное отклонение							0.04	0.01	0.04	0.04	0.04	0.04		0.07	0.07
№ 8. 18 июля, $t_0=11$ ч 03 мин 18.1 с; $\varphi = 44.45^\circ$, $\lambda = 35.99^\circ$; $h = 20$ км; $K_{п} = 9.6$															
OPUK	<i>P</i>	Z	76	0.06		3.5	13.9	0.67	2.06	6.87	0.33	4.32	-3.29	4.76	3.37
OPUK	<i>S</i>	N+E	76		0.9	2.1	34.8	0.64	5.85	19.5	0.9	1.72	1.2	33.9	3.63
SUDU	<i>P</i>	Z	92	0.1		3.2	21.8	0.73	2.47	8.25	0.44	2.75	-1.5	8.98	3.5

Продолжение таблицы 4.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
SUDU	S	N+E	92		0.9	1.9	33.7	0.71	4.2	14.0	0.72	1.78	0.32	23.6	3.62
SIM	P	Z	158	0.06		3.1	33.0	0.75	3.41	11.4	0.62	1.81	-0.1	18.8	3.62
SIM	S	N+E	158		0.6	1.85	37.9	0.72	4.35	14.5	0.77	1.58	0.6	27.5	3.66
SEV	P	Z	184	0.01		3.45	17.0	0.67	2.42	8.08	0.4	3.52	-2.31	6.9	3.42
S — среднее значение							25.8	0.7	3.32	11.1	0.56	2.32	0.66	14.3	3.54
δS — стандартное отклонение							0.07	0.01	0.06	0.06	0.06	0.06		0.12	0.08
№ 9. 15 августа, $t_0=12$ ч 11 мин 05.4 с; $\varphi = 44.41^\circ$, $\lambda = 34.32^\circ$; $h = 22$ км; $K_{II} = 8.7$															
YAL	P	Z	16	0.06		5.1	3.42	0.46	1.57	5.24	0.17	3.12	-2.33	0.89	2.96
YAL	S	N+E	16		0.5	3.1	6.4	0.46	2.94	9.81	0.33	1.66	-0.19	3.14	3.14
SIM	P	Z	62	0.015		4.9	1.71	0.48	0.7	2.32	0.08	6.23	-5.88	0.2	2.76
SIM	S	N+E	62		0.3	2.9	5.76	0.49	2.17	7.23	0.26	1.85	-0.76	2.08	3.11
SUDU	P	Z	75	0.015		5.0	3.47	0.47	1.5	5.01	0.17	3.07	-2.32	0.9	2.96
SUDU	S	N+E	75		0.23	3.0	7.11	0.45	3.48	11.6	0.38	1.5	0.25	4.13	3.17
S — среднее значение							4.18	0.47	1.82	6.1	0.21	2.55	-1.64	1.28	3.02
δS — стандартное отклонение							0.1	0.01	0.1	0.1	0.1	0.1		0.2	0.12

Примечание: $\Sigma\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м · с — спектральная плотность по полному вектору колебаний поперечной волны (N+E). Номера землетрясений соответствуют табл. 1.

Для большинства землетрясений 2023 года динамические параметры получены по группе ($n \geq 3$) независимых станционных определений (табл. 4), что позволило в некоторой степени нивелировать влияние особенностей условий среды под станциями регистрации и на пути очаг-станция, а также неравномерность направленности излучения сейсмических волн и тем самым обеспечить надежность окончательных оценок расчетных параметров. Только для одного относительно слабого сейсмического толчка (№ 3), с энергетическим классом $K_{II} = 7.6$, динамические параметры рассчитаны по спектрам записей P и S-волн одной из ближайших к очагу станции «Севастополь», расположенной, на эпицентральной расстоянии $\Delta = 62$ км. Наилучшая сходимости станционных определений (табл. 4), получена для радиуса круговой дислокации r_0 преимущественно при стандартном отклонении $\delta r_0 = 0.01$. Значения моментных магнитуд M_w для большинства землетрясений определены с погрешностью не выше ± 0.1 . В целом можно отметить, что с увеличением количества независимых станционных определений стандартное отклонение существенно уменьшается для всех динамических параметров. Наилучшая сходимости всех индивидуальных станционных определений и, соответственно, малые величины δS получены для землетрясений 27 февраля и 22 июня, для которых очаговые параметры восстановлены с учетом направленности излучения сейсмической энергии из источника на станции регистрации ($R_{\theta\varphi}$), рассчитанной из решения механизма очагов. Кроме того, для определения средних значений S использовано $n=7$ и $n=12$, соответственно, станционных определений.

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

Радиационное трение $\Delta\sigma_r$ для изученных землетрясений, кроме наиболее сильного 22 июня, имело отрицательное значение, что в соответствии с [14] указывает на сложное скольжение разрыва в очаге за счет неравномерного распределения прочностных свойств глубинной среды в очаговых зонах. Во всем диапазоне энергий средняя величина сброшенных напряжений не превысила $\Delta\sigma = 33 \cdot 10^5 \text{ Па}$, а кажущихся напряжений $\eta\sigma < 16.2 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Наибольшие значения динамических параметров (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, \bar{u} , Eu и Mw) с хорошей внутренней сходимостью стационарных определений получены для ощутимого землетрясения 22 июня с $K_{\Pi} = 12.5$, а наименьшие — для 2 слабых толчков 9 и 21 марта с $K_{\Pi} = 7.5-7.6$ (№ 3 и № 5), следуя установленной зависимости роста количественных значений динамических параметров очагов от энергетического уровня землетрясений за предыдущий длительный период наблюдений [17,21,22] (рис. 6).

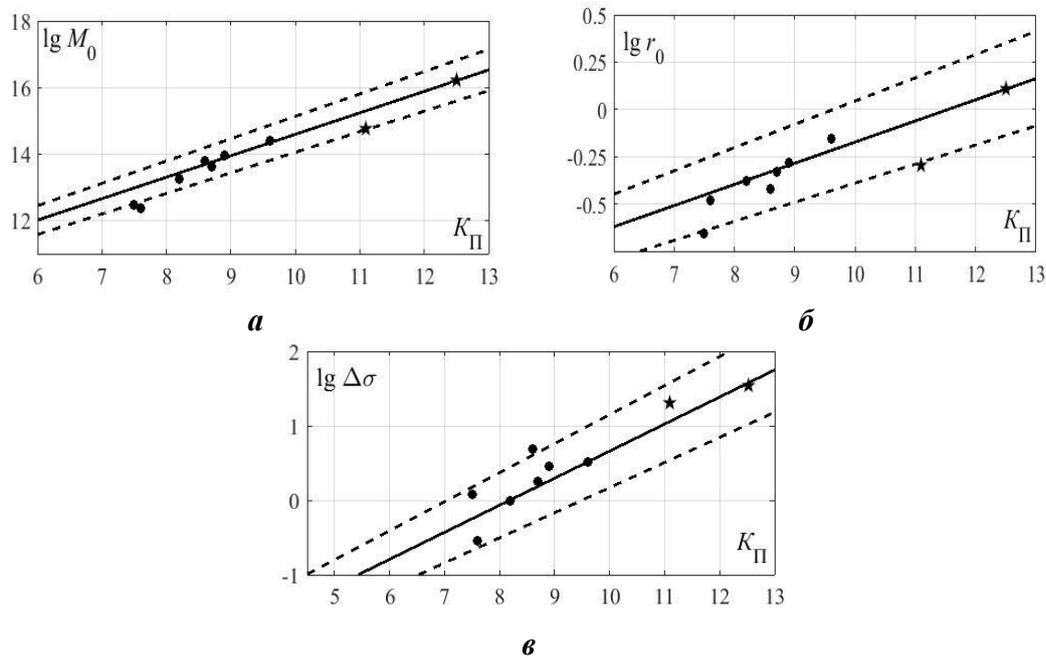


Рис. 6. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2023 г.: *a* — сейсмического момента M_0 , *б* — радиуса круговой дислокации r_0 и *в* — сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ с долговременными зависимостями $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ и $\Delta\sigma(K_{\Pi})$ из [21, 22]. Пунктир — пределы погрешностей долговременных зависимостей, звездочка — значения для землетрясения с известным механизмом очага.

Наглядно видно (рис.6), что средние значения основных очаговых параметров: M_0 , r_0 и $\Delta\sigma$ землетрясений за 2023 года соответствуют долговременным корреляционным зависимостям $M_0(K_{\Pi})$, $r_0(K_{\Pi})$ и $\Delta\sigma(K_{\Pi})$, находясь в диапазоне их доверительного интервала. Поскольку параметры очагов 2023 г. относятся к

достаточно надежным, то их вариации внутри интервала погрешностей M_0 (K_{II}), r_0 (K_{II}) и $\Delta\sigma(K_{II})$ можно отнести к естественным, связанным с индивидуальными особенностями свойств глубинной среды и физических процессов в отдельных очаговых зонах. Так дислокация в очаге ощутимого землетрясения 27 февраля произошла на сравнительно малой площади разрыва (заниженный радиус r_0), вызвав высокочастотные колебания объемных волн. При этом потребовалось совершить меньшую работу для сброса и перемещения плоскостей разрыва (заниженное значение M_0). Напомним, что как r_0 , так и M_0 определены с малой дисперсией δS по достаточно большому числу стационарных определений ($n=7$) и с учетом реальной направленности излучения из очага и относятся к очень надежным.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Амплитудные спектры смещения пересчитаны в спектры энергии с использованием формулы по работе [18]:

$$q = \frac{\rho c}{2\pi l g e} \omega^3 \Omega^2(\omega)$$

где $\Omega(\omega)$ — модуль спектральной плотности из амплитудного спектра, ρ — плотность пород в окрестности очага, c — скорость распространения объемных волн.

Все рассчитанные энергетические спектры землетрясений 2023года имели характерную резонансную форму с выраженным максимумом в ограниченной области частот f_{qmax} , на которые приходится наибольшая доля плотности сейсмической энергии q_{max} (рис. 7).

В результате интерпретации энергетических спектров определены их главные характеристики, представленные в таблице 5: частота f_{qmax} , с максимальной плотностью энергии q_{max} и логарифмическая ширина максимума спектра δf_q ($f_1 - f_2$), на уровне 0.75 от максимального значения q_{max} в высокочастотной (f_{q1}) и низкочастотной (f_{q2}) части спектра. Для продольных волн значения даны по вертикальной составляющей Z, а для поперечных – по двум горизонтальным: север-юг (N) и восток-запад (E).

Таблица 5.

Основные характеристики энергетических спектров землетрясений 2023 г. по данным станции «Алушта»

№	Дата, м д ч	K_{II}	Δ , км	$f_{qmax}, Гц$			$\delta f_q (f_1 - f_2), Гц$		
				Z	N	E	Z	N	E
	03 21 03	7.5	73	6.55	5.13	2.67	0.64	0.45	0.63
1	10 25 15	6.2	28	11.1	4.5	4	0.63	0.54	0.53
2	10 25 23	5.0	28	6.34	5.5	4.72	0.5	0.56	0.5
3	10 26 03	5.2	23	-	5.49	5.5	-	0.69	0.65
4	10 26 04	7.2	20	11	4	3.51	0.64	0.54	0.55
5	10 27 13	6.5	19	10	6.5	4	0.77	0.53	0.5
6	10 27 14	7.4	19	11.1	4	4	0.66	0.6	0.56

Примечание — пронумерованы только связанные землетрясения (рой)

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

Поскольку землетрясения №1–6 являются взаимосвязанными событиями, произошедшими в одной очаговой зоне за короткий промежуток времени и их спектры получены по записям одной станции, то есть возможность пренебречь влиянием среды и рассмотреть систему спектров (рис. 8).

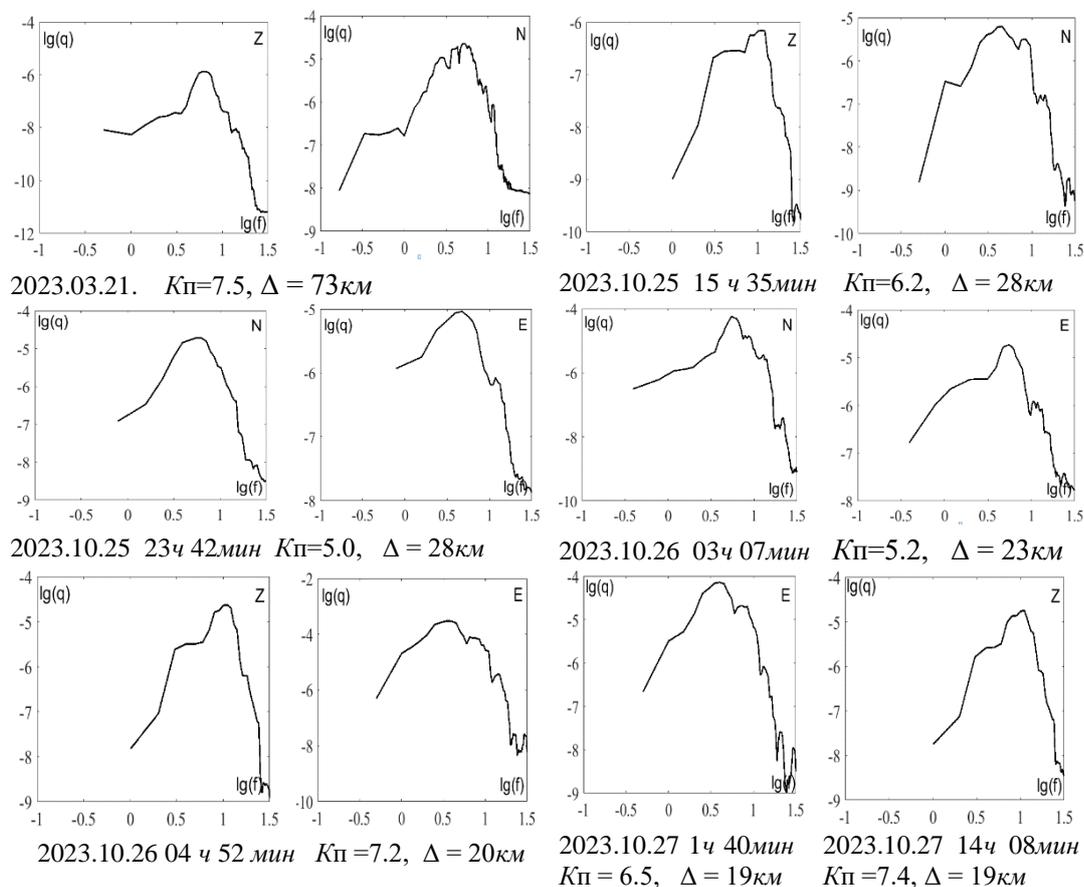


Рис. 7. Примеры сглаженных энергетических спектров землетрясений Крыма 2023 г. по записям объемных сейсмических волн на станции «Алушта». Параметры землетрясений даны по табл. 2.

Несмотря на естественные индивидуальные особенности энергетических спектров, в общей их системе отчетливо просматривается повышение уровня плотности энергии q_{max} и смещение максимальных частот f_{max} в низкочастотную область спектра с ростом энергетического класса землетрясений (рис. 8а–в). Особенно отчетливо это наблюдается для системы поперечных волн по составляющей записи E (рис. 8б).

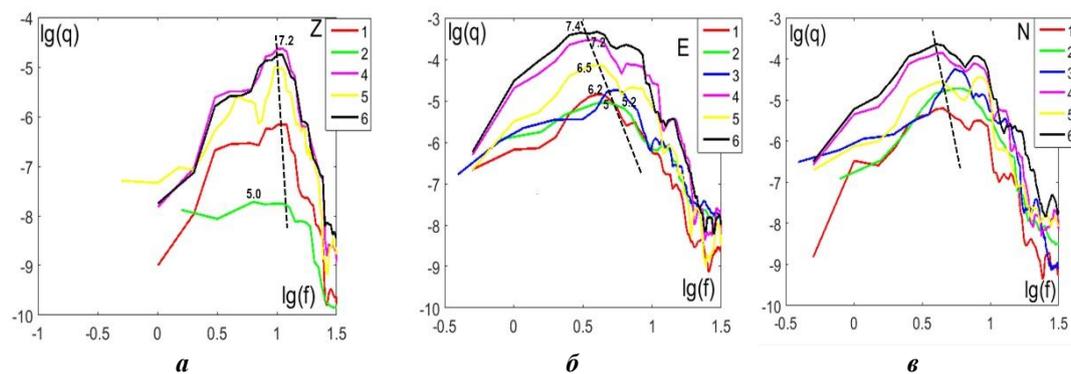


Рис. 8 Система энергетических спектров роя землетрясений 2023г по записям объемных волн на станции «Алушта»: **а** — продольных (Z); **б, в** — поперечных (E и N). Цифры: в легенде — номера землетрясений по табл. 5., на спектрах — значения энергетических классов $K_{п}$.

Для установления корреляционной связи параметров системы спектров с энергетическим уровнем землетрясений экспериментальных данных, полученных в настоящей работе, пока недостаточно как по энергетическому диапазону слабых толчков ($K_{п}=5.0\div 7.4$), так и по их количеству ($n=6$). Ранее по представительной выборке ($n=112$) пар параметров энергетических спектров локализованной группы землетрясений в широком диапазоне $K_{п}=6\div 12$ с эпицентрными расстояниями $\Delta=(20\pm 5)$ км, большая часть из которых являлась афтершоками землетрясения 1984года, была установлена тесная корреляционная зависимость максимального периода T_{max} при q_{max} от энергетического класса $K_{п}$ [17]. Экспериментальная система энергетических спектров афтершоков 1967 г. и 1984 г. по данным станции «Ялта» была положена в основу первой попытки моделирования системы средних теоретических энергетических спектров для очаговых зон землетрясений центральной части Крымского региона [23]. К сожалению, с тех пор подобные работы не получили своего продолжения в связи с большими трудностями обработки аналоговых сейсмограмм и отсутствием новых взаимосвязанных групп очагов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По материалам мониторинга сейсмичности в Крымско-Черноморском регионе в 2023 году получены новые результаты о динамических, кинематических и спектральных свойствах очагов местных землетрясений.

Для 9 особо значимых по территориальному и энергетическому критерию сейсмических событий в диапазоне энергетических классов $K_{п}=7.5\div 12.5$ ($M_w=2.2\div 4.8$) восстановлены динамические параметры очагов и магнитуды M_w по сейсмическому моменту с использованием цифровых записей сейсмических волн на 6 региональных станциях. Новые данные за 2023 г. хорошо согласуются со

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

средними долговременными параметрами и их зависимостями от энергетического уровня землетрясений.

Для двух наиболее сильных (ощутимых) землетрясений 27 февраля с $M_w = 3.8$ и 22 июня с $M_w = 4.8$ получены решения фокальных механизмов и определены кинематические параметры очагов. Тип подвижки в очаге 27 февраля — крутой сброс активного крыла разрыва под действием растягивающих напряжений близдиагональной ориентации. Такой тип подвижки является характерным для очагов центральной зоны региона [19]. В очаге землетрясения 22 июня произошел взброс по наиболее вероятной плоскости разрыва северо-восточного простирания, согласующейся с ориентацией зоны афтершоков.

По материалам мониторинга 2023 года дополнена статистика по спектрально-энергетическим свойствам объемных сейсмических волн по записям 7 слабых толчков ($K_p = 5.0 \div 7.5$) на станции «Алушта», из которых шесть относятся к взаимосвязанным, группирующимся событиям (рою). Для роя, произошедшего в одной очаговой зоне за короткий промежуток времени, когда влиянием условий вмещающей очаги среды можно пренебречь, построена и рассмотрена система энергетических спектров. В общей системе спектров наглядно видно повышение уровня плотности энергии q_{max} и смещение максимальных частот $f_{q_{max}}$ в низкочастотную область спектра с ростом энергетического класса землетрясений.

Исследования будут продолжены с целью получения статистически достаточных данных для создания специализированной базы данных, которую в перспективе планируется использовать при разработке семейства вероятных спектров сейсмических колебаний, оценки спектрально-временной составляющей сейсмической опасности Крыма, следуя работе [18], а также прогноза ожидаемых сильных сейсмических воздействий в инженерных терминах.

Список литературы

1. 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.
2. International Seismological Centre [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/> (дата обращения: 01.02.2024).
3. Колесникова Е.Я., Останин А.М., Бондарь М.Н., Бушмакина Г.Н. Результаты макросейсмического обследования последствий Крымского землетрясения 27 февраля 2023 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. 2023. Том 9(75). № 4. С. 156–169.
4. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. – М.: ИФЗ АН СССР, 1974. Т. 2. С. 113–125.
5. Пустовитенко Б.Г., Эреджепов Э.Э., Бондарь М.Н. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2021 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В.И. Вернадского. География. Геология. 2022. Том 8 (74). № 4. С. 80–96.
6. 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. Том 9 (75). № 4. С. 138–155.
7. Mogi K. Some discussions on afterschoke, foreshock and earthquake swarm – the fracture of a some-infinite body caused by on inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena. Bull. of the earthquakes. Res. Inst. Univ of Tokyo, 1963. Voll 41. Part 3. P. 615–640.

8. Введенская А.В. Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
9. 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.
10. 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.
11. Kennet, B.L.N. Seismological Tables: ak 135. Research School of earth Sciences Australian national University. Australia, Canberra, АСТ0200, 2005. 80 p.
12. 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.
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., Пантелеева Т.А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма – Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
18. Ризниченко Ю.В., Сейдузова С.С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. Москва: Наука, 1984. 180 с.
19. Вольфман Ю.М., Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я., Останин А.М. Обстановки сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Т. 2(68). № 4. С. 206–250.
20. Пустовитенко Б.Г. Динамические параметры очагов разрушительных Крымских землетрясений 1927 г. // Сейсмологический бюллетень Украины за 2001 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2003. С. 124–130.
21. 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.
22. 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.
23. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.А., Спиртус В.Б. Теоретические системы средних энергетических спектров по данным Крымского региона // Землетрясения Украины в 1991 году, Киев: Наукова думка, 1995, С. 85–91.

**FEATURES OF FOCAL PARAMETERS
OF THE 2023 CRIMEA EARTHQUAKES**

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

^{1,2,3}State Autonomous Institution "Crimean Republican Center for Seismic and Landslide Hazard Assessment, Technical Inspection of Construction Facilities", Simferopol, Russia

³Institute of seismology and geodynamics FSAEI HE «V.I. Vernadsky Crimean Federal University», Simferopol, Republic of Crimea, Russia

E-mail: ¹bpustovitenko@mail.ru

The article presents the results of the study and analysis of the general properties and features of the spectral, kinematic, dynamic and energy characteristics of earthquake foci in the Crimea-Black Sea region for 2023. For 9 earthquakes, the inverse problem of reconstructing the dynamic parameters of foci (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \bar{u} , E_u и M_w) was solved based on the amplitude spectra of body seismic waves using the theoretical Brunn dislocation model ($\omega-2$). New data on the dynamic parameters of foci for 2023 are in good agreement with the average long-term values and their correlation dependencies on the energy level of earthquakes.

For the two strongest earthquakes, on February 27 with $M_w = 3.8$ and on June 22 with $M_w = 4.8$, solutions of focal mechanisms were obtained within the framework of the double dipole dislocation model and the kinematic parameters of the foci were determined. The type of slip in the source on February 27 is a steep fault of the active rupture wing under the action of tensile stresses. In the source of the earthquake on June 22, a reverse fault occurred along the most probable plane of the rupture of north-eastern strike, which is consistent with the orientation of the aftershock zone.

The spectral and energy properties of seismic waves of seven earthquakes were studied based on energy spectra using seismograms from the «Alushta» station. A system of energy spectra was constructed for six interrelated events that occurred in one source zone over a short period of time. In the general system of spectra, an increase in the energy density level q_{max} and a shift in maximum frequencies f_{qmax} to the low-frequency region of the spectrum with an increase in the energy class of earthquakes are clearly visible.

The studies will be continued in order to obtain statistically sufficient data for the development of a family of probable spectra of seismic oscillations and an assessment of the spectral-temporal component of the seismic hazard of Crimea.

Keywords: focal mechanism, amplitude spectrum, Brun model, spectral density, angular frequency, dynamic parameters of the focal point, energy spectrum, system of energy spectra.

References

1. 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).
2. International Seismological Centre [Elektronnyj resurs]. URL: <https://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/> (data obrashcheniya: 01.02.2024).

3. Kolesnikova E. Ja., Ostanin A. M., Bondar' M. N., Bushmakina G. N. Rezul'taty makrosejsmicheskogo obsledovaniya posledstvij Krymskogo zemletrjaseniya 27 fevralja 2023 goda (Results of macroseismic survey of the consequences of the Crimean earthquake on February 27, 2023). *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografija. Geologija.* 2023. 9(75). no 4. pp. 156–169 (In Russian).
4. Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E. Ob energeticheskoj ocenke zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (On the energy assessment of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). *Magnituda i energeticheskaya klassifikaciya zemletryasenij*, Vol. 2. 1974, Moscow: IFZ AN SSSR, pp. 113–125 (in Russian).
5. Pustovitenko B. G., Jeredzhepov Je. Je., Bondar' M. N. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletrjasenij Kryma 2021 goda (Spectral and dynamic parameters of the foci of earthquakes in Crimea in 2021). *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografija. Geologija.* 2022. 8(74). no 4. pp. 80–96 (In Russian).
6. Pustovitenko B. G., Jeredzhepov Je. Je., Bondar' M. N. Spektral'nye i ochagovyje parametry zemletrjasenij Kryma 2022 goda (Spectral and focal parameters of the Crimean earthquakes in 2022). *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografija. Geologija.* 2023. 9(75). no 4. 138–155. (In Russian).
7. Mogi K. Some discussions on afterschoke, foreshock and earthquake swarm – the fracture of a some-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena.–*Bull. of the earthquakes. Res. Inst. Univ of Tokyo*, 1963. Voll 41. Part 3. P. 615–640.
8. 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).
9. 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).
10. 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).
11. Kennet, B.L.N. *Seismological Tables: ak 135.* Research School of earth Sciences Australian national University. Australia, Canberra, ACT0200, 2005. 80 p.
12. Brune I. V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1970. V. 75, no. 26, pp. 4997–5009.
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. Spektry 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 sejsmologiya.* 1989, no. 2, pp. 66–79 (in Russian).
14. Kostrov B. V. *Mehanika 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 // *J. Geophys. Res.* 1979, V. 84. no. 35, pp. 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), 20–42 (In Russian).
17. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovyje parametry zemletryasenij Kryma (Spectral and focal parameters of Crimea earthquakes). Kiev: Naukova dumka, 1990. 251 p. (in Russian).
18. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. Spektral'no-vremennaya harakteristika sejsmicheskij opasnosti (Spectral-temporal characteristics of seismic hazard). M.: Nauka, 1984. 180 p. (in Russian).
19. Vol'fman Yu. M., Pustovitenko B. G., Kolesnikova E. Ya., Ostanin A. M. *Obstanovki sejsmogenezha Krymsko-Chernomorskogo regiona (po dannym reshenij mehanizmov ochagov zemletryasenij)*

ОСОБЕННОСТИ ОЧАГОВЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2023 ГОДА

- (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, V. 4(70), no. 4, pp. 206–250 (in Russian).
20. Pustovitenko B. G. Dinamicheskie parametry ochagov razrushitel'nyh Krymskih zemletrjasenij 1927 g. (Dynamic parameters of foci of destructive Crimean earthquakes in 1927). Seismologicheskij bjulleten' Ukrainy za 2001 god. 2003, Sevastopol, Ukraine: NPC «ECOSY-Hydrophysica» Publ., pp. 124–130 (In Russian)
 21. 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). Sejsmichnost' Severnoj Evrazii. Obninsk, Russia: GS RAS Publ., pp. 238–242. (In Russian).
 22. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Izucheniye napryazhenij i deformacii v ochagovyh zonah zemletryasenij Kryma po spektram zapisej seysmicheskikh 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).
 23. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A., Spirtus V. B. Teoreticheskie sistemy srednih jenergeticheskikh spektrov po dannym Krymskogo regiona (Theoretical systems of average energy spectra based on data from the Crimean region). Zemletrjasenija Ukrainy v 1991 godu, Kiev: Naukova dumka, , pp. 85–91 (in Russian).

Поступила в редакцию 16.09.2024 г.