

УДК 550.348.435

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2018 ГОДА

Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э., Бондарь М. Н.

*Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия
E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

Приведены результаты расчета и анализа спектральных и динамических параметров очагов (M_0 , m , $\Delta\sigma$, ε , $\eta\sigma$, $\Delta\sigma_r$, \bar{u} , E_u и M_w) девяти землетрясений Крыма 2018 года в диапазоне энергетических классов $K_{II}=6.3-11$. Динамические параметры очагов восстановлены по спектрам записей продольных и поперечных сейсмических волн, зарегистрированных шестью цифровыми региональными сейсмическими станциями. Рассчитано 70 станционных амплитудных спектров, положенных в основу определения динамических параметров очагов с использованием теоретической дислокационной модели Брюна. На примере данных по станции «Алушта» рассмотрены энергетические спектры изученных землетрясений. Дается анализ полученных результатов.

Ключевые слова: амплитудный спектр, модель Брюна, спектральная плотность, угловая частота, сейсмический момент, радиус дислокации, сброшенное и кажущееся напряжения, подвижка по разрыву, радиационное трение, энергетический спектр.

ВВЕДЕНИЕ

Современные алгоритмы и методы обработки сейсмических колебаний позволяют определять основные параметры (время возникновения, координаты гипоцентров, энергетический уровень и магнитуду) всех зарегистрированных сейсмических событий. В то же время с определением дополнительных параметров, к каким относятся физические характеристики очага, дело обстоит гораздо сложнее. Это связано с жесткими условиями, отбором волновых форм для анализа, знанием условий среды на пути распространения сейсмических волн, амплитудно-частотных характеристик сейсмографов и др. В связи с этим восстановление динамических параметров очагов не входит в обязательный регламент работ в центрах обработки данных и является научно-методической и исследовательской задачей. Крым относится к тем единичным регионам, где ежегодно определяются и публикуются динамические параметры очагов для наиболее сильных представительных местных землетрясений.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Для расчета спектров и определения на их основе динамических параметров очагов выбраны все наиболее значимые представительные сейсмические события 2018 года с $K_{II}>10.0$, а также несколько слабых толчков, произошедших на материковой части Южного берега Крыма и в менее изученном Судакско-Феодосийском районе. Пространственное расположение эпицентров девяти землетрясений с энергетическими классами $K_{II}=6.3-11$, для которых определены очаговые параметры, даны на рисунке 1, а их основные параметры по данным сводной обработки в Крыму приведены в таблице 1.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2018 ГОДА

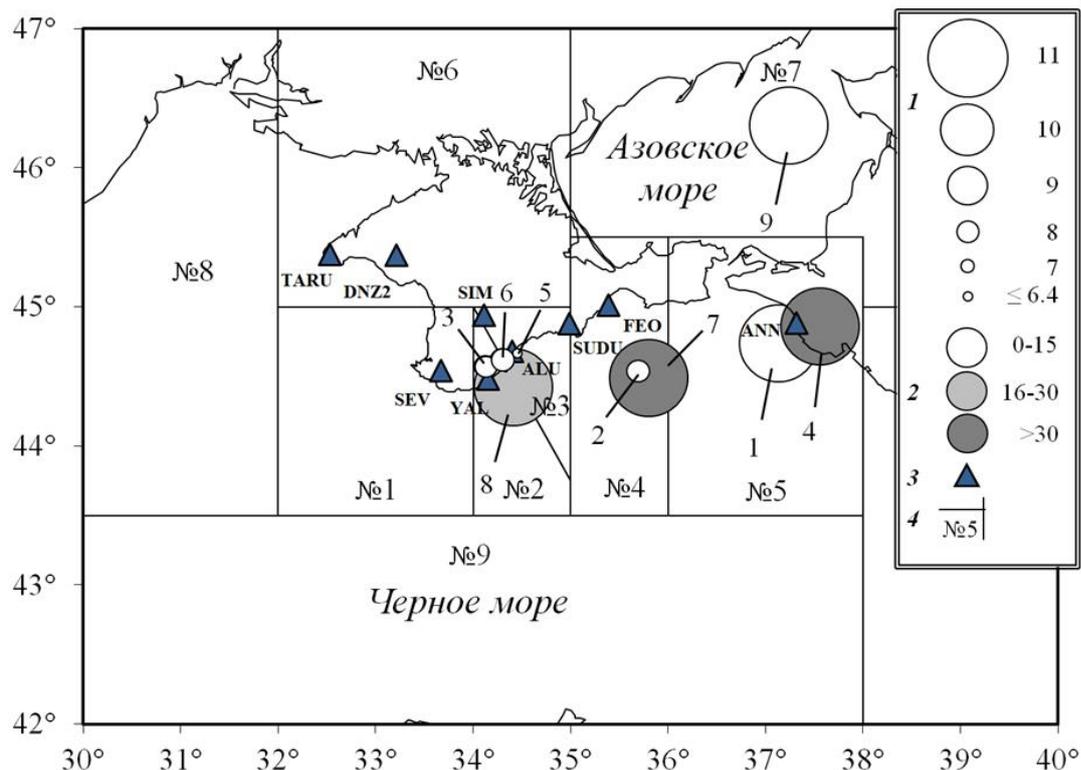


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2018 г., для которых восстановлены очаговые параметры: 1 – энергетический класс K_{II} [1]; 2 – глубина очага; 3 – сейсмические станции; 4 – граница районов. Цифры рядом с эпицентрами – номера землетрясений в соответствии с таблицей 1.

Наибольшее количество изученных землетрясений (3 события), произошли в Ялтинской зоне очагов (район №2), по два – в Судакско-Феодосийской и Керченско-Анапской (районы №4 и №5), по одному в Алуштинской (район №3) и Азово-Кубанской (№9).

Для расчета амплитудных спектров и восстановления по ним динамических параметров очагов использовано 18 записей продольных (P) и 52 поперечных (S) волн на семи сейсмических станциях: «Алушта» (ALU), «Севастополь» (SEV), «Симферополь» (SIM), «Судак» (SUDU), «Ялта» (YAL), «Тарханкут» (TARU) и «Донузлав-2» (DNZ2) или первоначальное название «Веселовка» (VSL), для которых в 2018 году уверенно определены амплитудно-частотные характеристики сейсмографов, а записи волновых форм отвечают всем требованиям критерия качества. Как и в предыдущие годы из анализа исключены сейсмограммы станции «Феодосия», осложненные высоким уровнем микросейсм. По этой же причине только в единичных случаях использованы записи станции «Тарханкут», наиболее удаленной от выбранных для исследования очагов землетрясений.

Таблица 1.
Основные параметры землетрясений Крыма за 2018 год, для которых
восстановлены динамические параметры очагов

| № | Дата, д м | t_0 , ч мин с | Эпицентр | | h , км | Магнитуда | | | $K_{П}$ | Район |
|---|--------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------------|-----------|----------------------|-------|---------|---------------------------------|
| | | | φ° , N | λ° , E | | M_c | M_w/n , Табл. 2 | MSH | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | 31.01 | 04 28 55.6 | 44.74 | 37.13 | 10 | 3.5 | 2.82/7 | 3.8 | 11.0 | Керченско-Анапский (№ 5) |
| 2 | 15.02 | 22 29 15.6 | 44.53 | 35.71 | 5 | | 2.72/3 | | 7.7 | Судакско- Феодосийский (№ 4) |
| 3 | 19.04 | 21 23 03.5 | 44.57 | 34.13 | 11 | | 2.95/4 | | 8.3 | Ялтинский (№ 2) |
| 4 | 24.04 | 20 47 42.0 | 44.86 | 37.56 | 33 | 3.7 | 3.83/7 | 3.9 | 10.7 | Керченско-Анапский (№ 5) |
| 5 | 11.05 | 04 57 0.10 | 44.66 | 34.46 | 10 | | 2.4/1 | | 6.3 | Алуштинский (№ 3) |
| 6 | 18.07 | 20 34 03.1 | 44.62 | 34.30 | 13 | | 2.84/5 | | 8.4 | Ялтинский (№ 2) |
| 7 | 09.09 | 07 47 04.1 | 44.49 | 35.80 | 35 | 3.2 | 3.82/6 | 4.0 | 10.8 | Судакско- Феодосийский (№ 4) |
| 8 | 13.09 | 05 45 23.0 | 44.42 | 34.41 | 29 | 2.8 | 3.7/4 | 3.5 | 10.5 | Ялтинский (№ 2) |
| 9 | 15.10 | 10 42 07.6 | 46.30 | 37.24 | 6 | | 4.24/7 | 4.0 | 11.0 | Азово-Кубанский (№ 7) |

Примечание. Параметры землетрясений в графах 2–7, 9–11 даны по данным сводной обработки в Крыму, значения M_w – из табл. 3, n – число индивидуальных определений, участвовавших в осреднении.

Наибольшее количество спектров получено по записям сейсмических станций «Симферополь», «Судак», «Ялта» и «Алушта». Процент участия этих же станций в общей оценке динамических параметров отдельных землетрясений также наибольший, соответственно 78%, 78%, 67% и 56%. Меньше всего для анализа привлечены записи станции «Тарханкут» (11%) и открытой только во второй половине 2018 г. – «Донузлав-2», с приемлемым уровнем микросейсмических шумов. Для расчета амплитудных спектров отобраны записи только с четкими формами объемных P - и S -волн, с превышением полезного сигнала над фоном помех в два и более раза. Примеры таких записей даны на рисунке 2.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2018 ГОДА

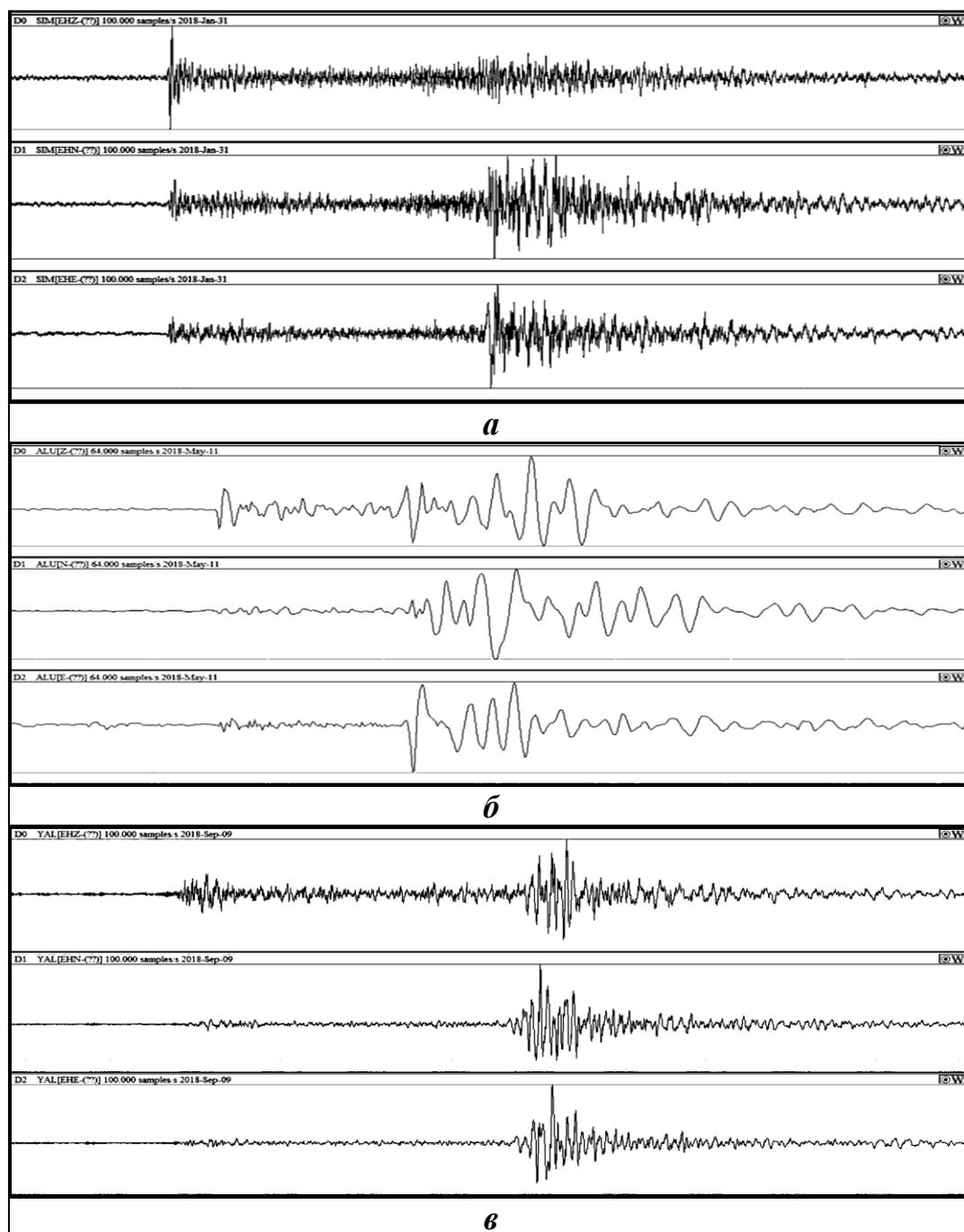
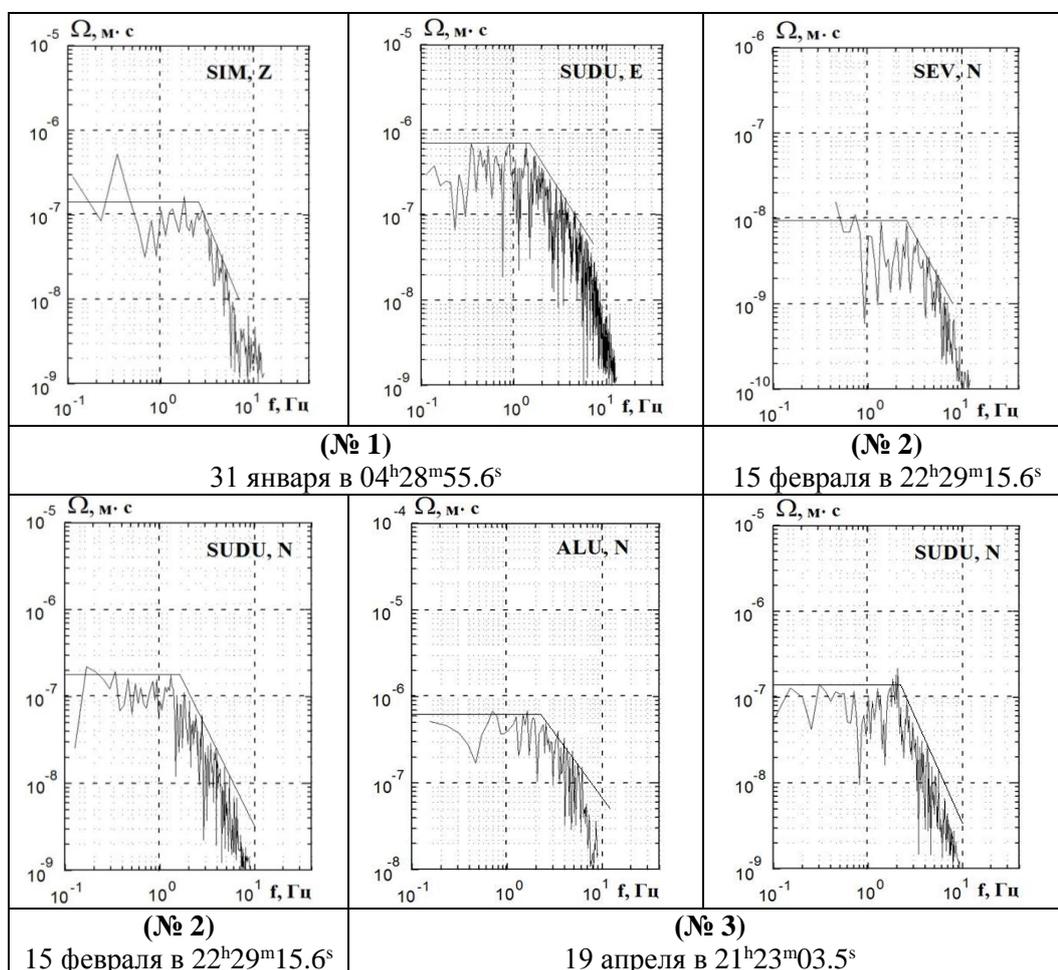


Рис. 2. Примеры записей землетрясений 2018 г.: *a* – 31 января с $K_{П} = 11.0$ (с/ст «Симферополь», $\Delta = 239$ км); *б* – 11 мая с $K_{П} = 6.3$ (с/ст «Алушта», $\Delta = 5$ км); *в* – 9 сентября с $K_{П} = 10.8$ (с/ст «Ялта», $\Delta = 131$ км).

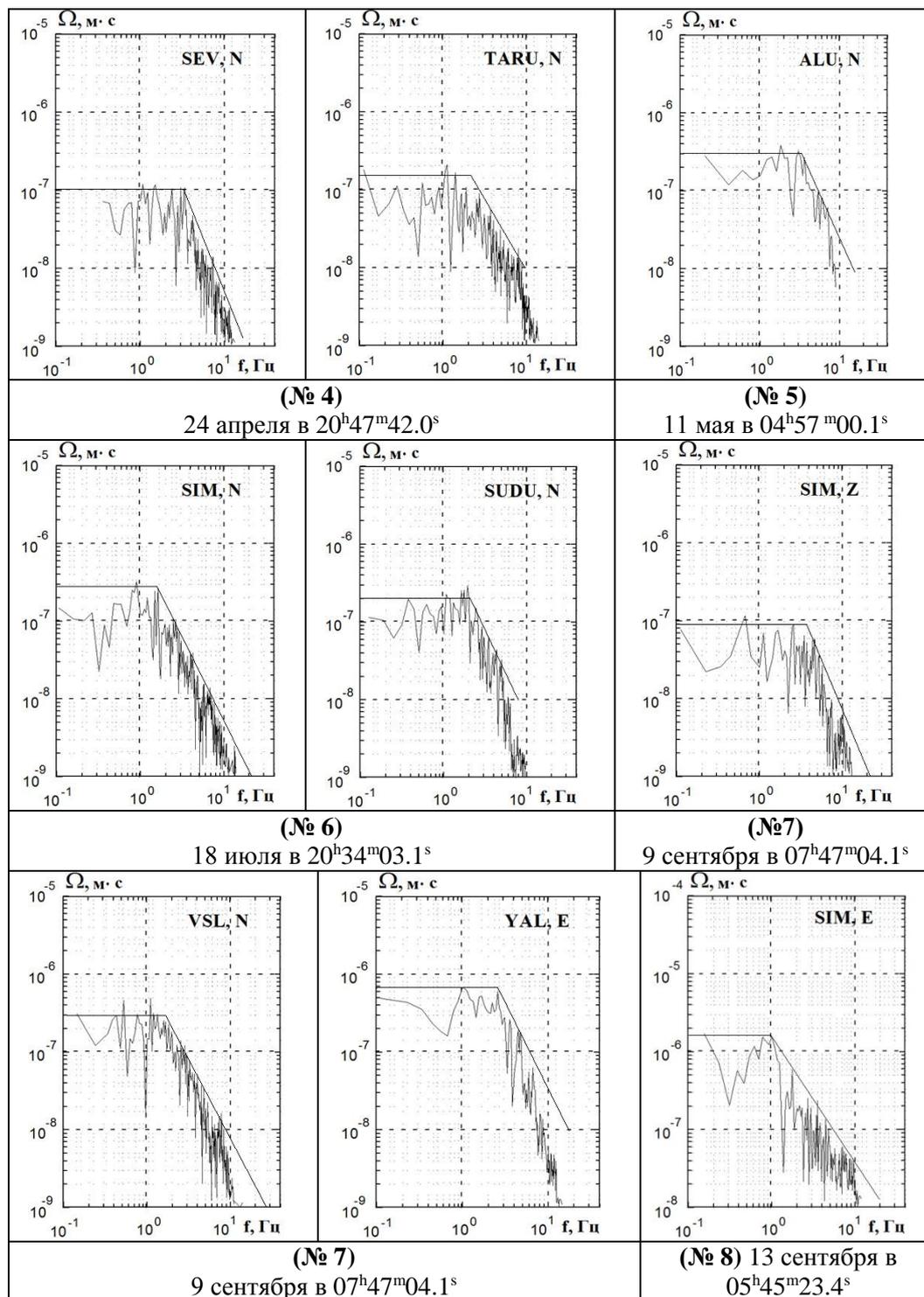
2. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ АМПЛИТУДНЫХ СПЕКТРОВ

Методика расчета, обработки и интерпретации амплитудных спектров не изменились по сравнению с предыдущими годами [2–4 и др.] Для поперечных волн (S) спектры рассчитывались по двум горизонтальным составляющим ($N-S$) и ($E-W$) и спектральная плотность вычислялась, как полный вектор колебаний, а продольных (P) – по вертикальной (Z). Относительная длительность τ исследуемого участка записи принята равной интервалу времени от момента вступления S - и P -волн до времени спада их амплитуд A_{\max} на уровень $1/3 A_{\max}$ [4].

Интерпретация амплитудных спектров выполнена в рамках теоретической дислокационной модели Брюна (ω^{-2}) [5], согласно которой спектр объемной волны аппроксимируется тремя основными параметрами: спектральной плотностью $\Omega_0(x, f)$ в длиннопериодной части (при $f \rightarrow 0$), угловой частотой f_0 (ω_0) и углом наклона $\gamma \sim -2$. Из Рис. 3 видно, что амплитудные спектры записей землетрясений Крыма за 2018 г. уверенно аппроксимируются в соответствии с выбранной моделью (ω^{-2}).



**СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2018 ГОДА**



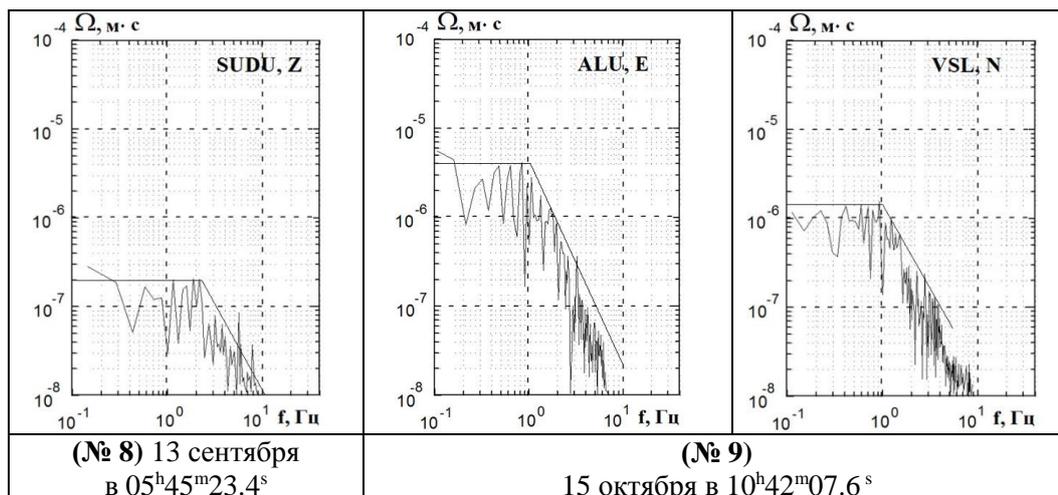


Рис. 3. Примеры амплитудных спектров объемных сейсмических волн землетрясений Крыма за 2018 г. по записям региональных цифровых сейсмостанций и их аппроксимация в рамках теоретической модели Брюна. Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в табл. 1.

3. РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОЧАГА

К динамическим параметрам очага относятся: скалярный сейсмический момент M_0 , радиус круговой дислокации r_0 , сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ε , кажущееся напряжение $\overline{\eta\sigma}$, величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$, средняя подвижка по разрыву \overline{U} (или величина дислокации), E_U – энергия образования дислокации в очаге. Для восстановления очаговых параметров в рамках дислокационной модели Брюна [5] используются две главные характеристики амплитудных спектров: спектральная плотность Ω_0 , которая пропорциональна скалярному сейсмическому моменту M_0 (1) и угловая частота f_0 , прямо связанная с размером дислокации r_0 (2).

$$M_0 = \Omega_0(4\pi\rho \cdot V^3)/R_{\theta\phi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega) \cdot Sm(f) \quad (1)$$

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; V – скорость распространения объемной волны; ρ – плотность пород в окрестности очага, $R_{\theta\phi}$ – направленность излучения из очага на станцию регистрации; $G(\Delta, h)$ – поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ – частотная характеристика среды под станцией, $Sm(f)$ – поправка за неупругое затухание в мантии.

Методика учета всех этих факторов при переходе от стационарного спектра к спектру источника подробно изложена в работах [4, 6, 7] и не изменилась по сравнению с предыдущими годами.

Для дислокационной модели Брюна с разрывом в виде круга, радиус

дислокации r_0 вычисляется по угловой частоте f_0 по формуле:

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

Другие динамические параметры очагов: сброшенное напряжение $\Delta\sigma$, величина деформации сдвига ε , кажущееся напряжение $\eta\bar{\sigma}$, величина радиационного трения $\Delta\sigma_r$, средняя подвижка по разрыву \bar{U} (или величина дислокации), энергия образования дислокации в очаге E_U и моментная магнитуда M_w определены по формулам из работ [4–6, 8, 9] с использованием значений сейсмического момента M_0 и размеров разрыва r_0 :

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

$$E_U = \frac{1}{2}\Delta\sigma \bar{U} \cdot \pi r_0^2, \quad M_w = \frac{2}{3}(\lg M_0 + 7) - 10.7, \quad (3)$$

где M_0 имеет размерность $H \cdot m$.

Большинство динамических параметров получено по группе независимых стационарных определений (табл. 2). Только для одного слабого сейсмического толчка (№ 5), с энергетическим классом $K_{II} = 6.3$, произошедшего на материковой части Крыма в зоне Демерджинского разлома, динамические параметры рассчитаны по записям только S -волн на одной, ближайшей к очагу станции «Алушта», расположенной на эпицентральной расстоянии 5 км.

Вычисление средних значений параметров и стандартных отклонений выполнено по индивидуальным стационарным определениям с учетом логнормального закона распределения величин с соответствующим стандартным отклонением [4]. В связи с тем, что стационарные значения радиационного трения $\Delta\sigma_r$ получились отрицательными или знакопеременными, их средние значения вычислялись по среднегеометрическим для данного очага напряжениям $\Delta\sigma$ и $\eta\bar{\sigma}$.

Среднее значение моментной магнитуды M_w определено как среднее арифметическое с соответствующей погрешностью.

Результаты определения стационарных и средних для землетрясения спектральных и динамических параметров представлены в таблице 2. Для каждой станции указаны эпицентральное расстояние Δ , км, тип использованной волны (P , S) и составляющая записи, где (N+E) означает полный вектор колебаний по горизонтальным оставляющим N+S и E-W. В Табл. 2 спектральная плотность по вектору колебаний дается как $\sum \Omega_0$ в колонке 6.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Волновые формы записей землетрясений и, соответственно, количественные параметры амплитудного стационарного спектра существенно зависят от параметров очага, направленности излучения из очага на станцию регистрации, от свойств

глубинной среды на пути распространения сейсмических волн и под каждой станцией регистрации, а также от ряда факторов, которые трудно учесть. Поэтому для усреднения индивидуальных станционных особенностей и надежных оценок очаговых параметров очагов землетрясений Крыма за 2018 год использованы записи нескольких станций и разных типов волн. Для большинства землетрясений осреднение очаговых параметров проведено по данным четырех и более станционных определений, что обеспечило в основном малую величину стандартного отклонения δX , показателя степени рассеяния индивидуальных оценок (табл. 2).

Наилучшая сходимость станционных определений, как и в предыдущие годы [2, 3] получена для радиуса круговой дислокации, размеры которого в явном виде не зависят от направленности излучения энергии из очага и условий среды под станцией регистрации (см. формулу 2). Степень рассеяния индивидуальных определений r_0 для большинства изученных землетрясений не превысила $\delta r_0 = 0.07$. Стандартные отклонения по другим параметрам для большинства землетрясений менее $\delta X < 0.3$. Наибольший разброс данных по станционным определениям отмечен для величины энергии дислокации E_U достигающий одного порядка и более. Соответственно, стандартное отклонение δE_U было максимальным от 0.15 до 0.33. Практически по всем очаговым параметрам, кроме радиуса дислокации, отмечен большой разброс станционных значений для землетрясения № 9 (15 октября с $K_p = 11$) с большой дисперсией ($\delta X = 0.12 - 0.24$). Значения моментных магнитуд M_w определены с высокой точностью, с погрешностью не выше ± 0.2 .

Наибольшие значения динамических параметров (M_0 , r_0 , $\Delta\sigma$, ϵ , $\eta\bar{\sigma}$, \bar{u} , E_U и M_w) получены для наиболее сильного землетрясения 15 октября (№ 9) с $K_p = 11$, произошедшего в Азово-Кубанском районе на глубине $h = 6$ км. Следует отметить, что все параметры другого сильного землетрясения (№ 1, 31 января) такого же энергетического уровня с $K_p = 11$, получились значительно ниже, чем для № 9, вероятно, связанные с индивидуальными особенностями прочностных свойств вмещающей очаги глубинной среды и разными скоростными моделями на трассе очаг – станции регистрации. Не исключено и влияние направленности излучения, когда без знания механизма очага поправка R_{0f} в формуле 1 принимается одинаковой, средней по всем направлениям, равной 0.4 [4].

Радиационное трение $\Delta\sigma_r$ для всех исследованных землетрясений имело отрицательное значение, что 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 $\Delta\sigma = 10 \cdot 10^5$ Па (10 бар), а кажущихся напряжений $\eta\bar{\sigma} < 12 \cdot 10^5$ Па (12 бар).

Следует отметить, что значения сейсмических моментов M_0 и r_0 , восстановленные по записям станций «Севастополь» и «Ялта», как и в предыдущие годы [2, 3], получились ниже, чем по другим станциям Крыма. Для заключения о причинах наблюдаемых отклонений необходимы дальнейшие наблюдения и пополнения статистических данных для анализа.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2018 ГОДА

Таблица 2.

Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма за 2018 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 | $\varepsilon \cdot 10^{-6}$ | $\dot{u} \cdot 10^{-2}$, м | $\eta \sigma \cdot 10^5$, Па | $\Delta \sigma_r \cdot 10^5$, Па | $E_v \cdot 10^8$, Дж | M_w^* |
|---|-------|--------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------|---------------------------|--------------|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| № 1. 31 января, $t_0=04$ ч 28 мин 55.6 с; $\varphi = 44.74^\circ$, $\lambda = 37.13^\circ$; $h = 10$ км; $K_{п} = 11.0$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| ALU | S | N+E | 215 | | 1.2 | 1.4 | 143 | 0.9 | 8.46 | 28.2 | 1.86 | 5.58 | -1.35 | 202 | 4.04 |
| SIM | P | Z | 239 | 0.15 | | 2.7 | 109 | 0.83 | 8.44 | 28.1 | 1.69 | 7.3 | -3.08 | 154 | 3.96 |
| SIM | S | N+E | 239 | | 1.3 | 1.45 | 86.2 | 0.87 | 5.66 | 18.9 | 1.2 | 9.26 | -6.43 | 81.4 | 3.89 |
| SUDU | P | Z | 169 | 0.1 | | 2.7 | 38.8 | 0.83 | 2.99 | 9.98 | 0.6 | 20.6 | -19.1 | 19.4 | 3.66 |
| SUDU | S | N+E | 169 | | 1.2 | 1.6 | 84.7 | 0.79 | 7.48 | 24.9 | 1.44 | 9.42 | -5.68 | 106 | 3.89 |
| YAL | P | Z | 237 | 0.04 | | 3.1 | 34.7 | 0.72 | 4.05 | 13.5 | 0.7 | 23 | -21.0 | 23.4 | 3.63 |
| YAL | S | N | 237 | | 0.3 | 1.9 | 39.4 | 0.67 | 5.83 | 19.4 | 0.94 | 20.2 | -17.3 | 38.3 | 3.67 |
| X- среднее значение | | | | | | | 66.96 | 0.80 | 5.77 | 19.24 | 1.12 | 11.91 | -9.0 | 64.54 | 3.82 |
| стандартное отклонение | | | | | | | 0.09 | 0.017 | 0.06 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | | 0.15 | 0.14 |
| № 2. 15 февраля, $t_0=22$ ч 29 мин 15.6 с; $\varphi = 44.53^\circ$, $\lambda = 35.71^\circ$; $h = 5$ км; $K_{п} = 7.7$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| SEV | S | N+E | 161 | | 0.014 | 2.7 | 0.62 | 0.44 | 0.32 | 1.06 | 0.03 | 2.55 | -2.39 | 0.033 | 2.47 |
| SUDU | P | Z | 69 | 0.015 | | 3.5 | 1.63 | 0.59 | 0.36 | 1.19 | 0.05 | 0.97 | -0.79 | 0.097 | 2.74 |
| SUDU | S | N+E | 69 | | 0.16 | 2.1 | 3.42 | 0.57 | 0.82 | 2.73 | 0.11 | 0.46 | -0.005 | 0.47 | 2.96 |
| X- среднее значение | | | | | | | 1.51 | 0.53 | 0.46 | 1.51 | 0.05 | 1.04 | -0.81 | 0.11 | 2.72 |
| стандартное отклонение | | | | | | | 0.21 | 0.04 | 0.13 | 0.13 | 0.16 | 0.22 | | 0.33 | 0.17 |
| № 3. 19 апреля, $t_0=21$ ч 23 мин 03.5 с; $\varphi = 44.57^\circ$, $\lambda = 34.13^\circ$; $h = 11$ км; $K_{п} = 8.3$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| ALU | S | N+E | 25 | | 1.1 | 2.2 | 9.68 | 0.58 | 2.22 | 7.41 | 0.31 | 0.49 | 0.6 | 3.58 | 3.26 |
| SIM | S | N+E | 42 | | 0.3 | 1.7 | 4.18 | 0.74 | 0.43 | 1.48 | 0.08 | 1.15 | -0.93 | 0.31 | 3.02 |
| SUDU | S | N+E | 77 | | 0.13 | 2.1 | 3.34 | 0.6 | 0.67 | 2.22 | 0.1 | 1.44 | -1.11 | 0.37 | 2.95 |
| YAL | S | N+E | 10 | | 0.17 | 3.2 | 0.87 | 0.40 | 0.62 | 2.05 | 0.06 | 5.5 | -5.1 | 0.09 | 2.56 |
| X- среднее значение | | | | | | | 3.29 | 0.57 | 0.79 | 2.66 | 0.11 | 1.45 | -1.06 | 0.44 | 2.95 |
| стандартное отклонение | | | | | | | 0.22 | 0.06 | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.22 | | 0.33 | 0.19 |
| № 4. 24 апреля, $t_0=20$ ч 47 мин 42.0 с; $\varphi = 44.86^\circ$, $\lambda = 37.56^\circ$; $h = 33$ км; $K_{п} = 10.7$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| ALU | S | N+E | 250 | | 1.22 | 2.1 | 180 | 0.67 | 25.7 | 85.6 | 4.2 | 2.67 | 10.2 | 768 | 4.11 |
| SEV | P | Z | 308 | 0.03 | | 4.0 | 28.2 | 0.61 | 5.3 | 17.7 | 0.8 | 16.9 | -14.2 | 24.9 | 3.57 |
| SEV | S | N+E | 308 | | 0.15 | 3.1 | 26.9 | 0.46 | 12.4 | 41.2 | 1.37 | 17.7 | -11.5 | 55.4 | 3.56 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---|---|-----|-----|-------|------|------|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| SIM | P | Z | 271 | 0.11 | | 2.9 | 90.7 | 0.85 | 6.52 | 21.7 | 1.34 | 5.24 | -1.98 | 98.6 | 3.91 |
| SIM | S | N | 271 | | 0.6 | 1.95 | 94.5 | 0.73 | 10.8 | 36.0 | 1.9 | 5.03 | 0.37 | 170 | 3.92 |
| SUDU | P | Z | 202 | 0.12 | | 3.0 | 99 | 0.82 | 7.87 | 26.2 | 1.56 | 4.8 | -0.87 | 130 | 3.93 |
| TARU | S | N+E | 398 | | 0.3 | 2.2 | 69.5 | 0.64 | 11.4 | 38.1 | 1.78 | 6.84 | -11.3 | 132 | 3.83 |
| X- среднее значение | | | | | | | 69.78 | 0.67 | 10.09 | 33.63 | 1.64 | 6.83 | -1.79 | 117.3 | 3.83 |
| стандартное отклонение | | | | | | | 0.11 | 0.03 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.11 | | 0.17 | 0.15 |
| № 5. 11 мая, $t_0=04$ ч 57 мин 00.1 с; $\varphi = 44.66^\circ$, $\lambda = 34.46^\circ$; $h = 10$ км; $K_{\Pi} = 6.3$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| ALU | S | N+E | 5 | | 0.33 | 3.1 | 0.5 | 0.38 | 0.39 | 1.29 | 0.036 | 0.2 | -0.02 | 0.033 | 2.4 |
| № 6. 18 июля, $t_0=20$ ч 34 мин 03.1 с; $\varphi = 44.62^\circ$, $\lambda = 34.30^\circ$; $h = 13$ км; $K_{\Pi} = 8.4$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| SIM | P | Z | 39 | 0.025 | | 4.0 | 1.22 | 0.50 | 0.42 | 1.4 | 0.051 | 4.36 | -4.15 | 0.09 | 2.66 |
| SIM | S | N+E | 39 | | 0.3 | 2.1 | 3.06 | 0.6 | 0.63 | 2.11 | 0.09 | 1.74 | -1.43 | 0.32 | 2.93 |
| SUDU | P | Z | 63 | 0.025 | | 4.0 | 1.94 | 0.5 | 0.67 | 2.22 | 0.08 | 2.75 | -2.42 | 0.22 | 2.8 |
| SUDU | S | N+E | 63 | | 0.25 | 2.2 | 4.03 | 0.54 | 1.11 | 3.7 | 0.15 | 1.32 | -0.77 | 0.75 | 3.01 |
| YAL | S | N+E | 19 | | 0.25 | 3.2 | 1.83 | 0.40 | 1.29 | 4.32 | 0.12 | 2.91 | -2.26 | 0.4 | 2.78 |
| X- среднее значение | | | | | | | 2.22 | 0.50 | 0.76 | 2.54 | 0.09 | 2.4 | -2.02 | 0.29 | 2.84 |
| стандартное отклонение | | | | | | | 0.09 | 0.03 | 0.09 | 0.09 | 0.08 | 0.09 | | 0.15 | 0.11 |
| № 7. 9 сентября, $t_0=07$ ч 47 мин 04.1 с; $\varphi = 44.49^\circ$, $\lambda = 35.80^\circ$; $h = 35$ км; $K_{\Pi} = 10.8$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| SIM | P | Z | 143 | 0.09 | | 2.95 | 392 | 0.83 | 2.97 | 9.9 | 5.51 | 0.6 | 12.3 | 19.4 | 3.67 |
| SIM | S | N+E | 143 | | 2.5 | 1.5 | 208 | 0.94 | 10.8 | 36.1 | 2.48 | 2.62 | 2.79 | 376 | 4.15 |
| DNZ2 | P | Z | 227 | 0.065 | | 2.8 | 44.9 | 0.88 | 2.9 | 9.68 | 0.62 | 12.2 | -10.7 | 21.7 | 3.7 |
| DNZ2 | S | N+E | 227 | | 0.53 | 1.55 | 69.9 | 0.91 | 4.02 | 13.4 | 0.89 | 7.81 | -5.8 | 46.8 | 3.83 |
| YAL | P | Z | 131 | 0.12 | | 3.0 | 48.3 | 0.82 | 3.84 | 12.9 | 0.76 | 11.7 | -9.39 | 30.9 | 3.73 |
| YAL | S | N+E | 131 | | 1.0 | 1.9 | 76.8 | 0.74 | 8.13 | 27.1 | 1.47 | 7.11 | -3.04 | 104 | 3.86 |
| X- среднее значение | | | | | | | 99.14 | 0.85 | 4.76 | 15.91 | 1.43 | 4.81 | -2.43 | 53.6 | 3.82 |
| стандартное отклонение | | | | | | | 0.15 | 0.02 | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 0.21 | | 0.20 | 0.12 |
| № 8. 13 сентября, $t_0=05$ ч 45 мин 23.4 с; $\varphi = 44.42^\circ$, $\lambda = 34.41^\circ$; $h = 29$ км; $K_{\Pi} = 10.5$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| SIM | S | N+E | 63 | | 1.56 | 1.2 | 53.2 | 1.18 | 1.42 | 4.73 | 0.41 | 6.33 | -5.62 | 12.6 | 3.75 |
| SUDU | P | Z | 70 | 0.2 | | 2.25 | 39.2 | 1.09 | 1.31 | 4.86 | 0.35 | 8.59 | -7.9 | 8.6 | 3.67 |
| YAL | P | Z | 21 | 0.6 | | 3.8 | 55.3 | 0.65 | 8.94 | 29.8 | 1.4 | 6.08 | -1.61 | 82.4 | 3.77 |
| YAL | S | N+E | 21 | | 1.73 | 2.3 | 30.3 | 0.62 | 5.68 | 18.9 | 0.85 | 11.1 | -8.28 | 28.7 | 3.59 |
| X- среднее значение | | | | | | | 43.24 | 0.85 | 3.12 | 10.67 | 0.64 | 7.78 | -6.22 | 22.5 | 3.70 |
| стандартное отклонение | | | | | | | 0.06 | 0.07 | 0.21 | 0.20 | 0.14 | 0.06 | | 0.22 | 0.07 |
| № 9. 15 октября, $t_0=10$ ч 42 мин 07.6 с; $\varphi = 46.30^\circ$, $\lambda = 37.24^\circ$; $h = 6$ км; $K_{\Pi} = 11.0$ | | | | | | | | | | | | | | | |
| ALU | P | Z | 285 | 1.0 | | 1.9 | 465 | 1.08 | 16.2 | 54.2 | 4.25 | 17.2 | 6.41 | 1260 | 4.38 |
| ALU | S | N+E | 285 | | 6.5 | 1.1 | 596 | 1.08 | 20.5 | 68.3 | 5.39 | 13.4 | 8.91 | 2030 | 4.45 |
| SIM | P | Z | 285 | 0.3 | | 1.92 | 140 | 1.07 | 5.03 | 16.8 | 1.3 | 5.72 | -3.2 | 117 | 4.03 |

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2018 ГОДА

Продолжение таблицы 2.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|------------------------|---|-----|-----|------|------|------|--------------|--------------|-------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------|
| SIM | S | N+E | 285 | | 7.0 | 1.0 | 642 | 1.19 | 16.6 | 55.3 | 4.79 | 1.24 | 7.05 | 1770 | 4.48 |
| SUDU | P | Z | 234 | 0.75 | | 1.85 | 287 | 1.11 | 9.25 | 30.8 | 2.48 | 2.78 | 1.84 | 443 | 4.24 |
| DNZ2 | S | N+E | 329 | | 2.33 | 1.05 | 247 | 1.14 | 7.38 | 24.6 | 2.03 | 3.24 | 0.45 | 303 | 4.2 |
| YAL | S | N+E | 314 | | 0.86 | 1.1 | 86.7 | 1.04 | 2.98 | 9.95 | 0.78 | 9.2 | -7.7 | 43.1 | 3.9 |
| X- среднее значение | | | | | | | 285.1 | 1.10 | 9.21 | 30.74 | 2.47 | 5.41 | -0.81 | 437.4 | 4.24 |
| стандартное отклонение | | | | | | | 0.12 | 0.007 | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.15 | | 0.24 | 0.17 |

Сравнение полученных в 2018 г. динамических параметров очагов со средними их долговременными величинами [4, 10], в отличие от предыдущих лет [2, 3, 11], проведено не только для сейсмического момента M_0 и радиуса круговой дислокации r_0 , но и для сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ (рис. 4). Для сравнения использованы зависимости $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\lg \Delta\sigma(K_{II})$ из [4, 10].

$$\lg M_0 = 0.645(\pm 0.027) K_{II} + 15.142(\pm 0.271), \quad \rho=0.99,$$

$$\lg r_0 = 0.112(\pm 0.011) K_{II} - 1.293(\pm 0.107), \quad \rho=0.93,$$

$$\lg \Delta\sigma = (0.42 \pm 0.01) K_{II} - (3.28 \pm 0.10), \quad \rho=0.9$$

где ρ – коэффициент корреляции.

Как видно из рисунка 4а, б, средние значения M_0 и r_0 большинства землетрясений 2018 г. находятся в пределах погрешностей долговременных зависимостей $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$. При этом, если значения r_0 для наиболее сильных сейсмических событий ($K_{II} > 10$) равномерно распределены относительно регрессии $r_0(K_{II})$, то для слабых толчков – выше средней $r_0(K_{II})$. Наибольшее отличие M_0 и r_0 от долговременных параметров получены для самого слабого землетрясения: 5 мая (№ 5) с $K_{II} = 6.3$, параметры которого восстановлены только по одной станции регистрации. Кроме того, для слабых очагов менее надежно определяется глубина очага и, соответственно, могут быть ошибки при выборе скоростных моделей среды.

Если в целом значения M_0 и r_0 за 2018 г. укладываются в диапазон доверительного интервала долговременных зависимостей $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$, полученным за длительный интервал времени аналоговой регистрации колебаний, то $\Delta\sigma$ для всех землетрясений выходят за его пределы, находясь преимущественно ниже $\Delta\sigma(K_{II})$ (рис. 4в). Наиболее значимые отрицательные отклонения от $\Delta\sigma(K_{II})$ получены для наиболее сильных землетрясений №1, 7 и 8, соответственно с K_{II} : 11, 10.8 и 10.5, произошедших в различных районах региона (2, 4 и 5). Ранее было показано, что сброшенные напряжения существенно меняются как в пространстве, так и во времени при одном энергетическом уровне [4, 12].

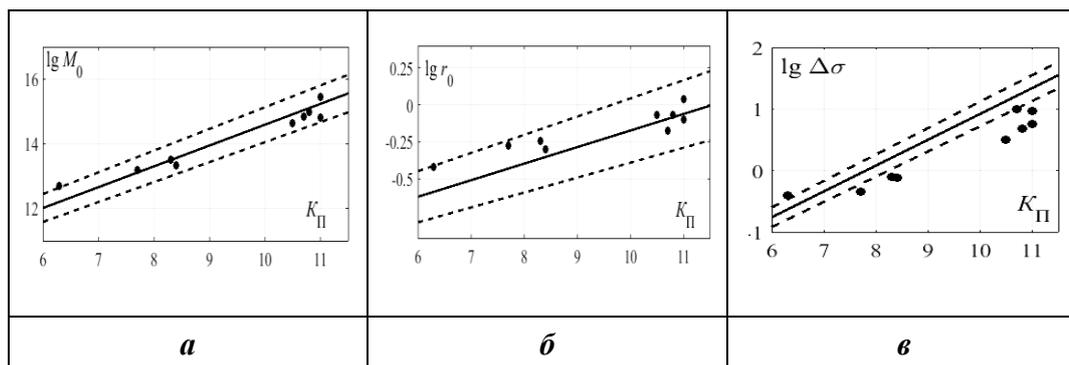


Рис. 4. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма за 2018 г.: **a** – сейсмического момента M_0 , **б** – радиуса круговой дислокации r_0 и **в** – сброшенного напряжения $\Delta\sigma$ с долговременными зависимостями $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$ и $\Delta\sigma(K_{II})$ [4, 10]. Пунктиром обозначены пределы погрешностей долговременных зависимостей.

5. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Спектральные свойства очагов землетрясений 2018 г. дополнительно изучены также по энергетическим спектрам. Переход от спектральной плотности амплитудного спектра к энергетическому спектру осуществлялся по формуле из [13]:

$$q = \frac{\rho c}{2\pi \lg(e)} \omega^3 \Omega^2(\omega) \quad (4)$$

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

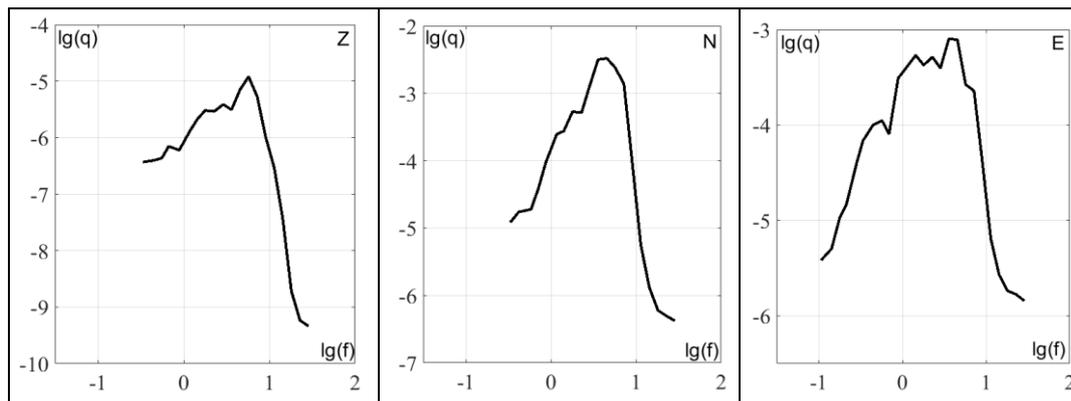
Методика и алгоритм расчета энергетических спектров, их обработка описаны в [4, 13, 14].

Чтобы наглядно графически представить и более точно оценить диапазон частот, на которые приходится максимум сейсмической энергии, энергетические спектры сглаживались скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот и представлены в билогарифмической системе координат (рис. 5).

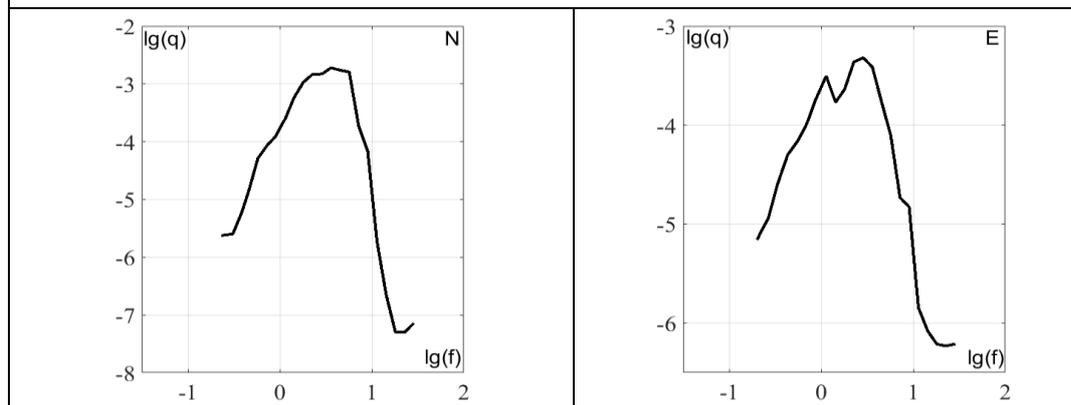
На Рис. 5 приведены примеры энергетических спектров только по станции «Алушта», для сравнения с обобщенной системой спектров, представленной в работе [14].

Для всех энергетических спектров получена характерная резонансная форма с одним выраженным максимумом плотности энергии q_{max} в ограниченной области частот, как для других землетрясений, Крымско-Черноморского региона, включая аналоговый период наблюдений [2, 4].

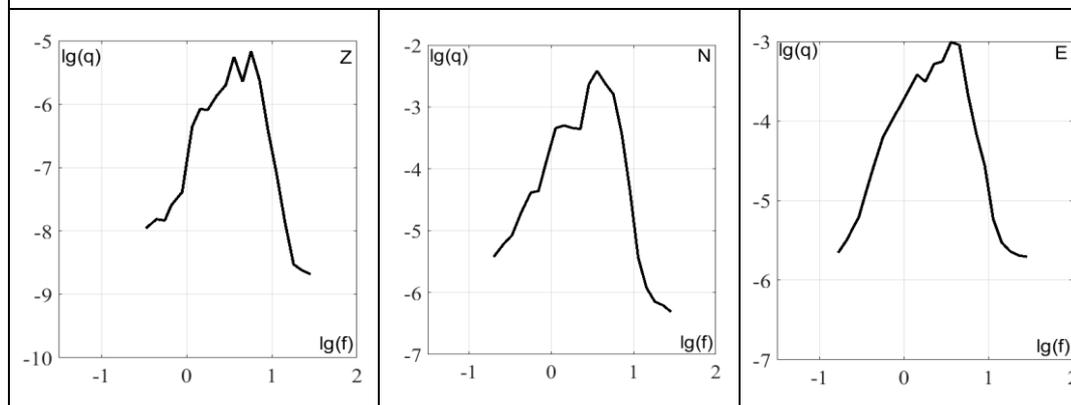
СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2018 ГОДА



№ 1. 31.01.2018 г.



№ 3. 19.04.2018 г.



№ 4. 24.04.2018 г.

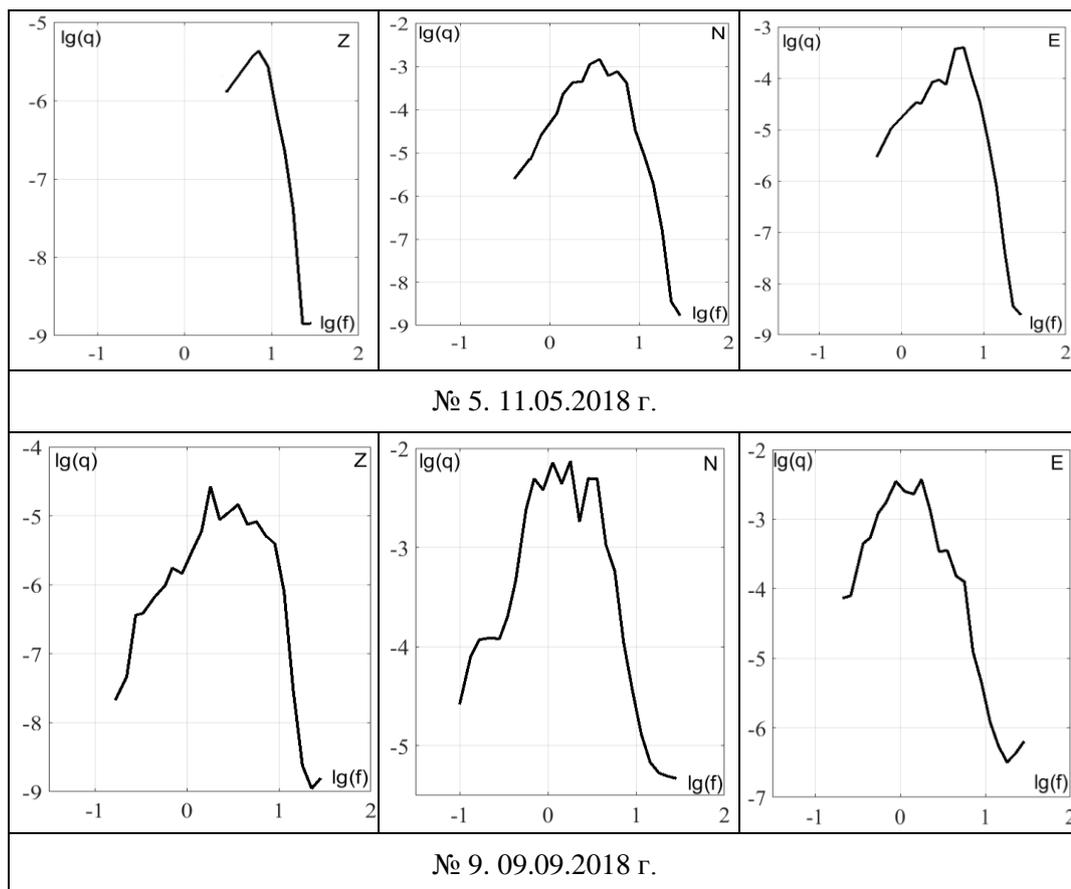


Рис. 5. Примеры энергетических спектров землетрясений Крыма 2018 г. по записям станции «Алушта». Номера и даты землетрясений соответствуют таковым в таблице 1.

Диапазон ширины максимума спектра δf q на уровне 0.9 от максимального значения q_{max} в высокочастотной (f_{q1}) и низкочастотной (f_{q2}) части спектра: δf $q = (f_{q1} - f_{q2})$ получился различным, для разного энергетического уровня землетрясений и эпицентрального расстояния. Результаты расчета δf q по разным составляющим записи (δf E, δf N, δf Z) представлены в таблице 3.

Сравним полученные результаты в 2018 г. с предыдущими исследованиями. В работе [15] база энергетических спектров по данным станции «Алушта» была условно разделена на 4 группы, отличающиеся эпицентрными расстояниями: 1 – (26±2) км; 2 – (46±3) км; 3 – (165±14) км; 4 – (235±12) км.

Землетрясение под номером № 3 2018 г. с эпицентрным расстоянием 25 км попадает в первую из отобранных групп очагов ($\Delta=26\pm 2$ км). Полученный для этого очага максимум $f_{q_{max}}$ на диапазонах частот 3.6 Гц и 2.9 Гц для поперечных N и E компонент находится в пределах погрешностей $f_{q_{max}} = (3.33\pm 0.33)$ Гц для данной группы [15]. Другие землетрясения №№ 1, 4, 5 и 9 по эпицентрным расстояниям

СПЕКТРАЛЬНЫЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА 2018 ГОДА

не вошли в диапазоны ранее условно выделенных групп. Особо следует отметить материковое землетрясение № 5, произошедшее в непосредственной близости к сейсмической станции «Алушта» ($\Delta=5$ км). Частота максимальных значений энергии для данного землетрясения смещена в область высоких частот и составляет: 3.6–5.7 Гц для горизонтальных (N и E) составляющих и 7.1 Гц – для вертикальной Z компоненты, что связано с пониженным затуханием высоких частот на малых эпицентральных расстояниях и низким энергетическим уровнем землетрясения ($K_{II}=6.3$).

Параметры энергетических спектров землетрясений №№ 4 и 9 можно объединить в новую группу с эпицентральными расстояниями 265 ± 18 км и добавить к базе данных для увеличения статистически значимых выборок и последующего анализа.

Таблица 3.

Характеристики энергетических спектров по данным станции «Алушта»

| №, Дата | K_{II} | $f_{qmax}, Гц$ | | | $\delta f_q (f_1 - f_2), Гц$ | | | $\Delta,$ км |
|----------------|----------|----------------|-----|-----|------------------------------|---------|----------|-----------------|
| | | Z | N | E | Z | N | E | |
| №1. 31.01.2018 | 11 | 5.7 | 4.5 | 3.6 | 4.5-7.2 | 2.9-7.2 | 3-5.4 | 215 |
| №3. 19.04.2018 | 8.3 | | 3.6 | 2.9 | | 1.8-5.9 | 2-3.7 | 25 |
| №4. 24.04.2018 | 10.7 | 5.6 | 3.6 | 3.6 | 3-7.1 | 2.6-5.6 | 2.9-4.8 | 250 |
| №5. 11.05.2018 | 6.3 | 7.1 | 3.6 | 5.7 | 3.54-9.1 | 2.5-4.5 | 3.7-6.9 | 5 |
| №9. 9.09.2018 | 11 | 1.8 | 1.4 | 1.2 | 1.5-3.5 | 0.9-3.6 | 0.76-2.1 | 285 |

ВЫВОДЫ

По результатам сейсмического мониторинга в 2018 г., база данных по спектральным и динамическим параметрам местных землетрясений Крыма дополнена 34 станционными определениями для 9 сейсмических событий в диапазоне энергетических классов $K_{II}=6.3\div 11$, произошедших в различных районах региона на эпицентральных расстояниях от 5 км (станция ALU) до 398 км (станция TARU). Средние значения динамических параметров очагов в большинстве случаев оценены по группе станций и по разным типам волн, что обеспечило в основном малую величину показателя степени рассеяния индивидуальных оценок. В этой связи, количественные оценки очаговых параметров землетрясений за 2018 год можно отнести к категории надежных для дальнейшего их использования в научных и научно-прикладных задачах сейсмологии и сеймотектоники. Спектральный состав сейсмических колебаний, несущих на себе максимальную сейсмическую энергию, изучен также по сглаженным энергетическим спектрам, дополнив статистику для построения и уточнения системы энергетических спектров, в частности, полученную ранее по данным станции «Алушта» [15].

Список литературы

1. Пустовитенко Б. Г., Кульчицкий В. Е. Об энергетической оценке землетрясений Крымско-Черноморского региона // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: ИФЗ АН СССР. 1974. Том 2. С. 113–125.
2. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона 2016 года // Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2017. Том 3 (69). № 4. С. 51–69.
3. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э., Бондарь М. Н. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Крыма 2017 года // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Том 4 (70). № 4. С. 69–83.
4. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 251 с.
5. 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.
6. 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 *P*-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.
7. Аптекман Ж. Я., Дараган С. К., Долгополов В. В., Захарова А. И., Зобин В. М., Коган С. Я., Корчагина О. А., Москвина А. Г., Поликарпова Л. А., Чепкунас Л. С. Спектры *P*-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Унификация исходных данных и процедуры расчета амплитудных спектров // Вулканология и сейсмология. 1985. № 2. С. 60–70.
8. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 179 с.
9. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale // J. Geophys. Res. 1979. V. 84, no. 35, pp. 2348–2350.
10. Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Капитанова С. А., Поречнова Е. И. Пространственные особенности очаговых параметров землетрясений Крыма // Сейсмичность Северной Евразии. Материалы Международной конференции. Обнинск: ГС РАН, 2008. С. 238–242.
11. Пустовитенко Б. Г., Мерзей Е. А., Пустовитенко А. А., Калинин И. В. Очаговые параметры землетрясений Крыма 2013 года // Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ Гидрофизика», 2014. С. 12–21.
12. Пустовитенко Б. Г., Мерзей Е. А., Пустовитенко А. А. Динамические параметры очагов землетрясений Крыма по данным цифровых сейсмостанций // Геофизический журнал. 2013. № 5. С. 172–186.
13. Ризниченко Ю. В., Сейдузова С. С. Энергетические спектры землетрясений // Региональные исследования сейсмического режима. Кишинев: Штиинца, 1974. С. 174–178.
14. Ризниченко Ю. В., Сейдузова С. С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. М.: Наука, 1984. 180 с.
15. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Сводные энергетические спектры землетрясений Крыма по записям сейсмической станции «Алушта» // Ученые записки Крымского Федерального Университета им. В. И. Вернадского. География. Геология. 2018. Том 4 (70). № 4. С. 191–206.

**SPECTRAL AND DYNAMIC PARAMETERS OF THE FOCI
OF 2018 CRIMEAN EARTHQUAKES**

Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., Bondar M. N.

*Institute of seismology and geodynamics FSAEI HE Of the V.I. Vernadsky Crimean Federal
University, Simferopol, Crimea, Russia
E-mail: bpustovitenko@mail.ru*

The results of studying the focal parameters of nine earthquakes of the Crimean-Black Sea region in 2018 with $K_{II} = 6.3-11$ are presented. The dynamic parameters of the source: the scalar seismic moment M_0 , the radius of the circular dislocation r_0 , the released stress drop $\Delta\sigma$, the magnitude of the shear strain ε , the apparent stress drop $\eta\sigma$, the amount of radiation friction $\Delta\sigma_r$, the average displacement along the gap \bar{u} , the dislocation formation energy in the source E_U , the magnitude of the seismic moment M_w , determined by the parameters of 70 amplitude spectra of bulk seismic waves recorded by six digital seismic stations in Crimea.

The dynamic parameters of the foci were calculated using the Brune dislocation model using the parameters of the amplitude spectra: spectral density Ω_0 , which is proportional to the scalar seismic moment M_0 and angular frequency f_0 , which is directly related to the dislocation size r_0 .

For the studied earthquakes in 2018, the average values of M_0 and r_0 were within the confidence intervals of the long-term dependences $M_0(K_{II})$, $r_0(K_{II})$. In this case, the released voltages $\Delta\sigma$ turned out to be less than the average values for the long-term dependence $\Delta\sigma(K_{II})$.

The spectral composition of seismic vibrations carrying the maximum seismic energy has also been studied from smoothed energy spectra.

An analysis of the interpretation of energy spectra is carried out using an example according to the Alushta station.

For all energy spectra, a characteristic resonance form was obtained with one pronounced maximum of the energy density q_{max} in a limited frequency range.

The range of the width of the spectrum maximum δf_q at the level of 0.9 from the maximum q_{max} in the high-frequency (f_{q1}) and low-frequency (f_{q2}) parts of the spectrum turned out to be different for different energy levels of earthquakes and epicentral distances.

Keywords: amplitude spectrum, Bruhne model, spectral density, angular frequency, seismic moment, dislocation radius, discharged and apparent stresses, displacement along a gap, radiation friction, energy spectrum.

References

1. Pustovitenko B. G., Kul'chickij V. E. Ob ehnergeticheskoy ocenke zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona (On the energy assessment of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). Magnituda i ehnergeticheskaya klassifikaciya zemletryasenij. M., IFZ AN SSSR, 1974, V. 2, pp. 113–125 (in Russian).
2. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Ochagovye parametry zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona 2016 goda (Focal parameters of earthquakes of the Crimean-Black Sea region in 2016). Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya, 2017, V. 3(69), no. 4, pp. 51–69 (in Russian).
3. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E., Bondar' M. N. Spektral'nye i dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma 2017 goda (Spectral and dynamic parameters of the centers of Crimea earthquakes in 2017). Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya, 2018, V. 4(70), no 4, pp. 69–83 (in Russian).
4. 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).

5. 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 (in English).
6. 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 seismologiya*, 1989, no 2, pp. 66–79 (in Russian).
7. Aptekman Zh. Ya., Daragan S. K., Dolgoplov V. V., 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. Unifikaciya iskhodnyh dannyh i procedury rascheta amplitudnyh spektrov (*P*-wave spectra in the problem of determining the dynamic parameters of earthquake sources. Unification of input data and procedures for calculating amplitude spectra). *Vulkanologiya i seismologiya*, 1985, no. 2, pp. 60–70 (in Russian).
8. Kostrov B. V. Mekhanika ochaga tektonicheskogo zemletryaseniya (The mechanics of the source of a tectonic earthquake). M., Nauka, 1975, 179 p. (in Russian).
9. Hanks T. C., Kanamori H. A. Moment magnitude scale. *J. Geophys. Res.*, 1979, V. 84, no. 35, pp. 2348–2350 (in English).
10. Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A., Kapitanova S. A., Porechnova E. I. Prostranstvennye osobennosti ochagovyh parametrov zemletryasenij Kryma (Spatial features of the focal parameters of Crimea earthquakes). *Sejsmichnost' Severnoj Evrazii: Materialy Mezhdunarodnoj konferencii*, Obninsk, GS RAN, 2008, pp. 238–242 (in Russian).
11. Pustovitenko B. G., Merzhej E. A., Pustovitenko A. A., Kalinyuk I. V. Ochagovye parametry zemletryasenij Kryma 2013 goda (Focal parameters of Crimea earthquakes in 2013). *Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 g.*, Sevastopol', NPC «EKOSI Gidrofizika», 2014, pp. 12–21 (in Russian).
12. Pustovitenko B. G., Merzhej E. A., Pustovitenko A. A. Dinamicheskie parametry ochagov zemletryasenij Kryma po dannym cifrovyyh sejsmostancij (The dynamic parameters of the centers of the earthquakes of Crimea according to digital seismic stations). *Geofizicheskij zhurnal*, 2013, no. 5, pp. 172–186 (in Russian).
13. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. Energeticheskie spektry zemletryasenij (Earthquake Energy Spectra). Regional'nye issledovaniya sejsmicheskogo rezhima, Kishinev, Shtiinca, 1974, pp. 174–178 (in Russian).
14. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. Spektral'no-vremennaya harakteristika sejsmicheskoy opasnosti (Spectral-temporal characteristics of seismic hazard), M., Nauka, 1984, 180 p. (in Russian).
15. Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E. Svodnye energeticheskie spektry zemletryasenij Kryma po zapisyam sejsmicheskoy stancii «Alushta» (Aggregate energy spectra of Crimea earthquakes according to the records of the Alushta seismic station). *Uchenye zapiski Krymskogo Federal'nogo Universiteta im. V.I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*, 2018, V. 4(70), no. 4, pp. 191–206 (in Russian).