

УДК.550. 348

СВОДНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА ПО ЗАПИСЯМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АЛУШТА»

Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э.

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

E-mail: bpustovitenko@mail.ru

Приведены первые результаты исследования сводных энергетических спектров цифровых записей продольных и поперечных сейсмических волн землетрясений Крыма. Использовано 50 цифровых записей 18 местных землетрясений в диапазоне энергетических классов $K_{\Pi}=7.2-11.2$ на станции «Алушта» за период 2014–2015 гг. Сводные энергетические спектры построены для четырех групп очагов с близкими эпицентрными расстояниями Δ до станции «Алушта»: 1 – 26 ± 2 км; 2 – 46 ± 3 км; 3 – 165 ± 14 км; 4 – 235 ± 12 км. Исследованы частоты, на которые приходится максимум плотности энергии ($f_q \max$) и ширина спектра δf_q на уровне 0.75 от $q \max$. Отмечено, что с ростом энергетического класса K_{Π} землетрясений уровень спектральной плотности q увеличивается во всем диапазоне эпицентральных расстояний, а значения $f_q \max$ с ростом величины q – уменьшаются. Получена корреляционная связь уменьшения значений $f_q \max$ с ростом эпицентральных расстояний.

Ключевые слова: энергетический спектр, ширина спектра, частота максимума спектров, система энергетических спектров

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в основу оценки сейсмической опасности положена описательная одномерная макросейсмическая интенсивность, что не позволяет непосредственно использовать ее для расчетов зданий и сооружений на сейсмические воздействия. Ю. В. Ризниченко, С. С. Сейдузова [1, 2] предложили в задачах инженерной сейсмологии использовать системы энергетических спектров землетрясений. Ими разработан переход от энергетических спектров смещений к спектрам ускорений и предложена методика спектрально-временного моделирования прогнозных сейсмических колебаний. Методика конструирования систем средних энергетических спектров местных землетрясений в работе [2] была продемонстрирована на примере обработки записей афтершоков Ташкентского землетрясения 1966 года на сейсмостанции «Ташкент».

Впервые система энергетических спектров для Крымского региона была построена для связанных последовательностей землетрясений 1967 года по записям сейсмической станции «Ялта» (эпицентральные расстояния $\Delta=25\pm 1$ км) и афтершоков ощутимого землетрясения 1984 г. по записям сейсмостанции «Алушта» (эпицентральные расстояния $\Delta=21\pm 1$ км) [3]. Эти же данные легли в основу расчета теоретической системы средних энергетических спектров для землетрясений центральной зоны региона с использованием одномодальной и двумодальной математических моделей [4]. В то время регистрация волновых форм землетрясений осуществлялась только аналоговым (гальванометрическим) методом на фотобумагу с разверткой записи 60 мм/мин и 120 мм/мин, а для расчета спектров применялся экспресс-метод с параболической интерполяцией [3, 5].

В настоящее время все региональные станции Крыма оснащены только

цифровыми сейсмостанциями, которые обладают высокой частотой дискретизации сейсмической записи по времени, не доступной ранее при оцифровке аналоговых записей землетрясений. Вместе с тем, при обработке цифровых записей для выделения сейсмических волн используются различные полосовые фильтры, от корректности выбора которых зависит достоверность результатов их дальнейшей интерпретации. Для проверки возможности продолжения в современный период пополнения статистических данных по спектральным характеристикам землетрясений Крыма и создания единой базы за длительный непрерывный ряд наблюдений ранее была проведена специальная методическая работа [6–8]. Было проведено сравнение спектральных и динамических параметров очагов землетрясений Крыма, в том числе энергетических спектров, рассчитанных по записям аналоговой и цифровой аппаратуры, позволившее сделать заключение о преемственности полученных ранее долговременных статистических свойств и закономерностей. В этой связи, исследования общих спектральных свойств совокупностей землетрясений необходимо продолжить с использованием представительного экспериментального сейсмологического материала в широком энергетическом, пространственном и временном диапазонах. При этом особое внимание актуально уделить изучению особенностей спектральных параметров по каждой сейсмостанции отдельно для учета станционных определений при построении обобщенной системы спектров прогнозных сильных сейсмических воздействий на территории Крыма.

Целью настоящей работы явилось построение сводных энергетических спектров четырех компактных групп землетрясений Крыма по записям региональной сейсмостанции «Алушта» с цифровой регистрацией.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве экспериментальной основы построения станционной системы энергетических спектров использовано 50 цифровых записей объемных сейсмических волн 18 местных землетрясений в диапазоне энергетических классов $K_{II}=7.2-11.2$ на станции «Алушта» за период 2014–2015 гг. Отобрано четыре группы очагов с близкими эпицентрными расстояниями Δ : 1 – 26 ± 2 км; 2 – 46 ± 3 км; 3 – 165 ± 14 км; 4 – 235 ± 12 км.

Методика расчета энергетических спектров по записям с цифровой регистрацией сейсмических колебаний сохранилась прежней, как и для сейсмограмм с аналоговой, подробно описанной в работах [1, 3].

Энергетические спектры пересчитаны из амплитудных с использованием записей как продольных P -, так и поперечных S -волн, соответственно, по вертикальной (Z) и горизонтальной ($N+E$) составляющим.

В работе [2] показано, что при изображении энергетического спектра в логарифмическом масштабе частот, площадь между спектральной кривой для абсолютных значений плотностей Ω и осью частот в любом интервале $\lg(\omega)$, пропорциональна сейсмической энергии, приходящейся на данный диапазон частот.

**СВОДНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА ПО
ЗАПИСЯМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АЛУШТА»**

Переход от спектральной плотности Ω к энергетическому спектру осуществляется по формуле:

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

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

Алгоритм расчета энергетических спектров, их обработка и построение системы спектров описаны в [1–3].

Для исключения осцилляций энергетические спектры сглажены скользящим осреднением в пределах октавной ширины по оси частот. Пример представления амплитудного и сглаженного энергетического спектра дан на Рис. 1.

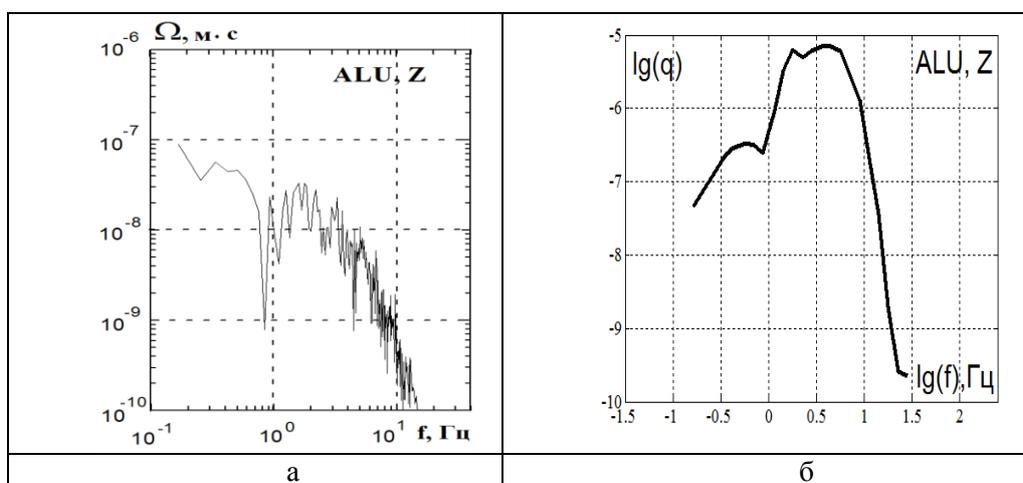


Рис. 1. Амплитудный (а) и сглаженный энергетический спектр (б) продольной волны P землетрясения 22 июля 2016 года в 21 ч 40 мин 13.6 с с $K_{П} = 11.6$ на сейсмостанции «Алушта». Эпицентральное расстояние 264 км [9].

В данном примере (Рис. 1 б) отчетливо видна характерная резонансная форма энергетических спектров с одним ярко выраженным максимумом в ограниченной области частот с завалом в обе стороны, как и для большинства землетрясений Крыма [3, 9].

Для построения системы прогнозируемых спектров энергии необходима статистика по основным параметрам спектров, таких, как преобладающие частоты, на которые приходится максимум плотности энергии ($f_{q\max}$), а также ширина спектра $\delta f_q = (f_{q1} - f_{q2})$ на уровне 0.75 от q_{\max} в высокочастотной (f_{q1}) и низкочастотной (f_{q2}) части спектра. Ниже рассмотрены результаты оценки спектральных параметров для четырех групп очагов по записям станции «Алушта».

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Спектральный состав сейсмических колебаний зависят от физических процессов в очаге, направленности излучения энергии в направлении очаг – станция, свойств глубинной среды в очаговой зоне и на пути распространения волн, инженерно-геологических условий среды под станцией регистрации, амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) сейсмографов и от других факторов, которые не всегда можно определить и учесть. В связи с этим получается широкое разнообразие индивидуальных станционных спектров. Для установления их общих свойств необходимо последовательно исключать влияние отдельных факторов. Так, в данной работе использована только одна станция регистрации «Алушта», т.е. исключены вариации за счет условий под станциями и АЧХ приборов, свойства глубинной среды в первом приближении усреднены разбиением данных по локализованным интервалам расстояний до станции регистрации. В результате удалось получить первые предварительные системы энергетических спектров (Рис. 2) и усредненные их спектральные характеристики (Табл. 1).

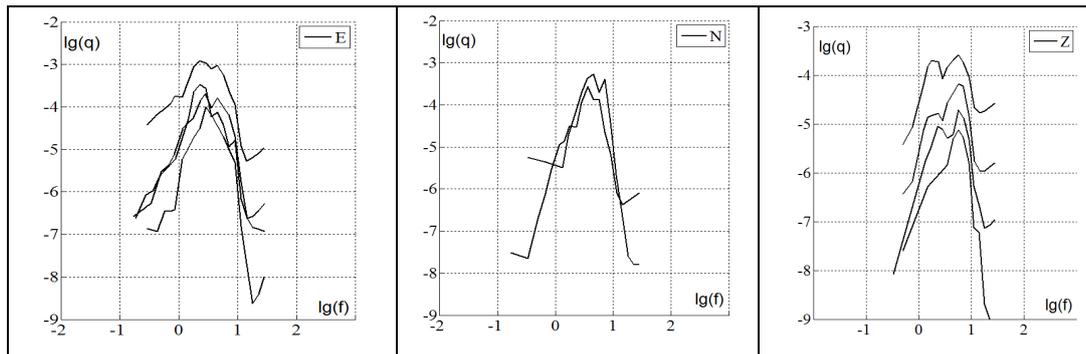
Таблица 1.

Характеристики энергетических спектров 4 групп землетрясений по записям сейсмической станции «Алушта»

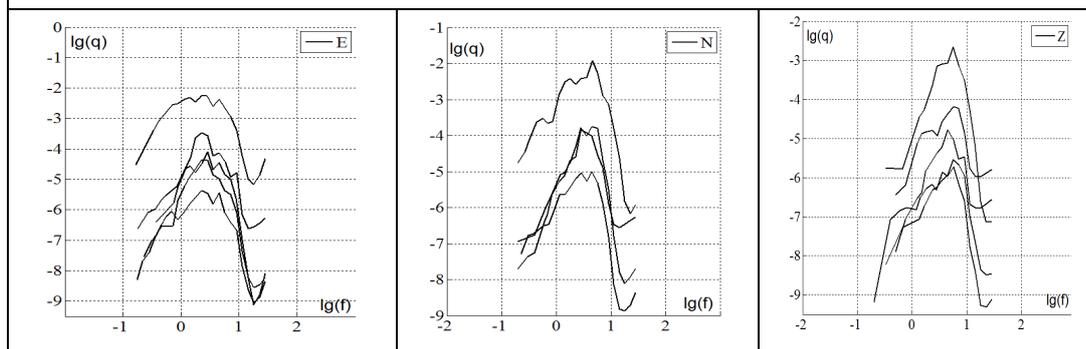
№	$K_{п}$	Δ , км	$f_q \max$, Гц		$\delta f_q (f_1 - f_2)$, Гц	
			$P(Z)$	$S(N+E)$	$P(Z)$	$S(N+E)$
1	7.7–9.8	26±2	5.75±0.02	3.33±0.33	5.97±0.28	5.32±0.6
2	7.2–11.2	46±3	5.4±0.3	3.3±0.3	5.9±0.46	4.85±0.2
3	8.7–10.8	165±14	4.85±0.85	2.37±0.41	6.66±0.19	4.78±0.33
4	8.5–10.8	235±12	4.6±0.43	2.3±0.25	4.56±1.06	3.99±0.55

Из Табл. 1 и Рис. 2 видно, что, несмотря на вариации индивидуальных спектров рассмотренных групп очагов и разных уровней $K_{п}$, общий диапазон $f_q \max$ и ширины спектра δf , находится в достаточно ограниченном интервале значений: $f_q \max = 2.3–3.3$ Гц, $\delta f_q = 4–5.3$ – для S -волн и $f_q \max = 4.6–5.8$ Гц, $\delta f_q = 4.6–6.7$ Гц – для P -волн.

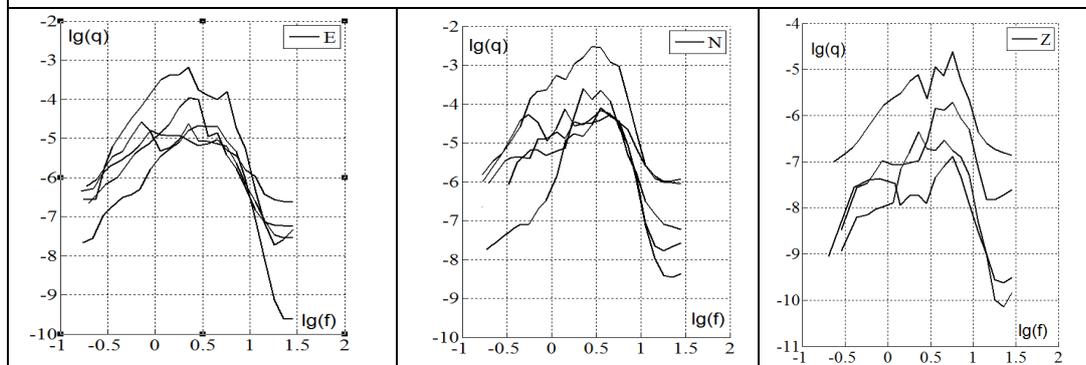
СВОДНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА ПО
ЗАПИСЯМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АЛУШТА»



№1. $\Delta=24-28$ км



№2. $\Delta=43-51$ км



№3. $\Delta=146-195$ км

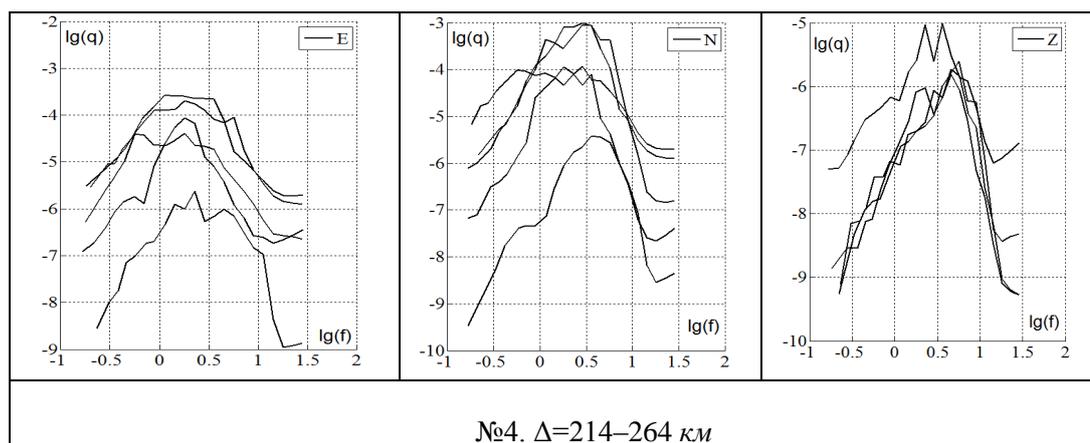


Рис. 2. Сводные энергетические спектры землетрясений Крымско-Черноморского региона по записям сейсмической станции «Алушта» (составляющие E, N, Z) для четырех групп очагов с разными эпицентрными расстояниями (№ групп по Табл. 1).

Можно отметить (Рис. 2), что с ростом энергетического класса K_{II} землетрясений уровень спектральной плотности q увеличивается во всем диапазоне эпицентральных расстояний по всем составляющим (Z, N, E). В тоже время четко выраженной корреляционной связи изменения частоты спектров $f_q \max$ и ширины спектра δf в зависимости от уровня энергии не выявлено, хотя заметна некоторая тенденция уменьшения $f_q \max$ с ростом величины q . Это связано как с недостаточной статистикой использованных данных внутри каждого диапазона эпицентральных расстояний, так и с индивидуальными особенностями отдельных очагов землетрясений. Ранее [3] тесная корреляционная зависимость максимального периода $T_q \max$ (или частоты $f_q \max$) энергетического спектра от энергетического класса K_{II} землетрясений была установлена по результатам аналоговой регистрации поперечных S -волн на станции «Алушта» для компактной группы очагов афтершоковой области землетрясений 1984 года (эпицентрные расстояния $\Delta = 21 \pm 1$ км). Методом ортогональной регрессии с использованием представительной выборки из 112 пар параметров в диапазоне $K_{II} = 6 - 12$ получено уравнение:

$$Lg T_q \max = Lg 1/f_q \max = (0.023 \pm 0.007) \cdot K_{II} - (0.79 \pm 0.015), \rho = 0.8 \quad (1)$$

Средние значения $f_q \max$, приведенные в Табл. 1 для первой группы очагов с близкими эпицентрными расстояниями $\Delta = (26 \pm 2)$ км и вычисленные по формуле 1, получились близкими между собой (в пределах погрешностей определяемых величин).

Известно, что спектральный состав колебаний сейсмических волн существенно меняется с расстоянием вследствие поглощения и рассеяния высоких частот в неоднородной среде. Это отразилось на характеристиках рассмотренных

СВОДНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КРЫМА ПО ЗАПИСЯМ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «АЛУШТА»

энергетических спектров для четырех групп очагов, расположенных на разных эпицентральных расстояниях (Табл. 1). Надежная прямая корреляционная связь уменьшения значений fq_{max} с ростом расстояний Δ получена в билогарифмическом масштабе для энергетических спектров продольных P - и S -волн, соответственно, уравнения 2 и 3:

$$\text{Lg } fq_{max} = (0.89 \pm 0.02) - (0.09 \pm 0.01) \cdot \text{Lg } \Delta, \quad \rho = 0.9 \quad (2)$$

$$\text{Lg } fq_{max} = (0.81 \pm 0.06) - (0.19 \pm 0.03) \cdot \text{Lg } \Delta, \quad \rho = 0.9 \quad (3)$$

Такая же тенденция уменьшения с расстоянием Δ отмечена и для ширины спектра δfq как по P -, так и по S -волнам (Табл.1), однако, строгой количественной зависимости не получено в виду малой статистики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования получены предварительные свойства сводных энергетических спектров 18 местных землетрясений Крыма, произошедших на разных эпицентральных расстояниях от станции регистрации «Алушта». Приведенные в данной работе первые результаты изучения энергетических спектров записей местных землетрясений по данным цифровой регистрации обнадеживают в перспективности продолжения выполнения экспериментальных работ для увеличения статистики по энергетическим, временным и пространственным диапазонам спектральных характеристик очагов. Общие спектральные свойства совокупности землетрясений и их станционные особенности в дальнейшем будут использованы в качестве основы для моделирования станционных и средних региональных систем энергетических спектров, прогноза спектральных параметров сейсмических воздействий в соответствии с методикой [10], оценки и картирования сейсмической опасности территории Крыма с позиции спектрально-временной сотрясаемости [2].

Список литературы

1. Ризниченко Ю. В., Сейдузова С. С. Энергетические спектры землетрясений. Региональные исследования сейсмического режима. Кишинев: Штиинца, 1974. С. 174–178.
2. Ризниченко Ю. В., Сейдузова С. С. Спектрально-временная характеристика сейсмической опасности. М: Наука, 1984. 180 с.
3. Пустовитенко Б. Г., Пантелеева Т. А. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. Киев: Наукова думка, 1990. 249 с.
4. 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.
5. Грудева Н. П., Малиновская Л. Н., Наймарк Б. Н. Приближенное вычисление спектров сейсмических колебаний. Методы и программы для анализа сейсмических наблюдений // Вычислительная сейсмология. 1967. Вып. 3. С. 52–109.

6. Пустовитенко Б. Г., Калинюк И. В., Мерзей Е. А., Пустовитенко А. А. Сравнение динамических параметров очагов землетрясений Крыма по данным цифровых и аналоговых записей // Землетрясения Северной Евразии за 2006 г. Обнинск: ГС РАН, 2012. С. 461–467.
7. Пустовитенко Б. Г., Мерзей Е. А. О преобладании долговременных закономерностей по очаговым параметрам землетрясений в эпоху цифровой регистрации // Геодинамика. 2013. N1(14). С. 124–128.
8. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Энергетические спектры землетрясений и возможность их использования в задачах моделирования сейсмических воздействий // Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць (будівництво). 2015. Вип. 82. Київ: ДП НДІБК. С. 67–73.
9. Пустовитенко Б. Г., Эреджепов Э. Э. Очаговые параметры землетрясений Крымско-Черноморского региона за 2016 год // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2017. Том 4(70), N4. С. 51–69.
10. Пустовитенко Б. Г., Мерзей Е. А. К прогнозу ожидаемых сейсмических воздействий от сильных землетрясений Крыма // Доповіді Національної Академії Наук України. 2014. N5. С. 102–109.

CONSOLIDATED ENERGY SPECTRA OF EARTHQUAKES OF CRIMEA ACCORDING TO THE ALUSHTA SEISMIC STATION

Pustovitenko B. G., Eredzhepov E. E.

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

The first results of the study of the combined energy spectra of digital records of longitudinal and transverse seismic waves of local earthquakes of the Crimea are given. 50 digital records of 18 local earthquakes in the range of energy classes $K_{II} = 7.2 - 11.2$ were used at the station «Alushta» for the period 2014–2015. Consolidated energy spectra were constructed for four groups of foci with close epicentral distances Δ to the «Alushta» station: 1 – 26 ± 2 km; 2 – 46 ± 3 km; 3 – 165 ± 14 km; 4 – 235 ± 12 km. The frequencies that account for the maximum energy density ($f_q \max$) and the width of the spectrum at the level of 0.75 of $q \max$ (δf_q) are investigated. It is noted that with increasing energy class K_{II} of earthquakes, the level of spectral density q increases in the whole range of epicentral distances both in P - and S -waves, and the values of $f_q \max$ with increasing q – decrease. A direct correlation is obtained for the decrease in $f_q \max$ values with increasing epicentral distances. The average $f_q \max$ of the energy spectra from digital records for the first group of foci with epicentral distances $\Delta = (26 \pm 2)$ km within the error of determining the values close to the values obtained earlier from analog records for the distances $\Delta = (21 \pm 2)$ km at the station «Alushta».

The first results of the study of the energy spectra of records of local earthquakes given by digital registration given in this paper are encouraging in the promise of continuing experimental work to increase the statistics on the energy, time and spatial ranges of the representative data.

Keywords: energy spectrum, spectral width, frequency of spectra maximum, system of energy spectra

References

1. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. Ehnergeticheskie spektry zemletryasenij. Regional'nye issledovaniya sejsmicheskogo rezhima. Kishinev: Shtiinca, 1974, pp. 174–178 (in Russian).
2. Riznichenko Yu. V., Sejduzova S. S. Spektral'no-vremennaya harakteristika sejsmicheskoy opasnosti. M.: Nauka, 1984, 180 p. (in Russian).
3. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A. Spektral'nye i ochagovye parametry zemletryasenij Kryma. Kiev: Naukova dumka, 1990, 249 p. (in Russian).
4. Pustovitenko B. G., Panteleeva T. A., Spirtus V. B. Teoreticheskie sistemy srednih ehnergeticheskikh spektrov po dannym Krymskogo regiona. Zemletryaseniya Ukrainy v 1991 godu. Kiev: Naukova dumka, 1995, pp. 85–91 (in Russian).
5. Grudeva N. P., Malinovskaya L. N., Najmark B. N. Priblizhennoe vychislenie spektrov sejsmicheskikh kolebaniy. Metody i programmy dlya analiza sejsmicheskikh nablyudenij // Vychislitel'naya sejsmologiya. 1967. Vyp. 3, pp. 52–109 (in Russian).
6. Pustovitenko B. G., Kalinyuk I. V., Merzhej E. A., Pustovitenko A. A. Sravnenie dinamicheskikh parametrov ochagov zemletryasenij Kryma po dannym cifrovyyh i analogovykh zapisej // Zemletryaseniya Severnoj Evrazii za 2006 g. Obninsk: GS RAN, 2012, pp. 461–467 (in Russian).
7. Pustovitenko B. G., Merzhej E. A. O preemstvennosti dolgovremennykh zakonomernostej po ochagovym parametram zemletryasenij v ehpohe cifrovoj registracii // Geodinamika. 2013, no. (14), pp. 124–128 (in Russian).
8. Pustovitenko B. G., Ehredzhepov E. E. Ehnergeticheskie spektry zemletryasenij i vozmozhnost' ih ispol'zovaniya v zadachah modelirovaniya sejsmicheskikh vozdeystvij // Budivel'ni konstrukcii: Mizhvidomchij naukovu-tekhnichnij zbirnik naukovih prac' (budivnictvo). 2015. Vip. 82. Kiïv: DP NDIBK, pp. 67–73 (in Russian).
9. Pustovitenko B. G., Ehredzhepov E. E. Ochagovye parametry zemletryasenij Krymsko-Chernomorskogo regiona za 2016 god // Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2017. Tom 4(70), no. 4, pp. 51–69 (in Russian).
10. Pustovitenko B. G., Merzhej E. A. K prognozu ozhidaemykh sejsmicheskikh vozdeystvij ot sil'nykh zemletryasenij Kryma // Dopovidi Nacional'noi Akademii Nauk Ukraini. 2014, no. 5, pp. 102–109 (in Russian).