

СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

И.П. Габсатарова, Л.С. Малянова

Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, ira@gsras.ru

Для шести землетрясений Северного Кавказа (табл. 1) построены спектры по записям станций «Сочи» и «Анапа» с использованием методики [1], примененной ранее [2–4] в этом же регионе. Большая часть событий локализованы вблизи Черноморского побережья Российской Федерации (рис. 1). Одно землетрясение – Курчалойское 11.10.2008 г. с $MS=5.6$ [5], $Mw=5.8$ [6] – произошло на Восточном Кавказе. Спектральные и очаговые параметры этого землетрясения даны в [7] наст. сб. и здесь не приводятся.

Таблица 1. Список землетрясений Северного Кавказа в 2008 г., для которых рассчитаны спектры

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	K_p	$MPVA$ [8]	$MPSP$ [5]	Район
			φ° , N	λ° , E					
1	22.03	01 35 58.3	43.95	39.09	3	9.2	3.7	4.2	Черное море
2	16.07	13 24 26.7	44.69	40.47	5	10.0	4.7	4.4	Краснодарский край
3	24.07	14 14 10.3	44.96	36.48	34	9.9	4.1	4.1	Черное море
4	22.09	05 47 27.2	45.22	37.77	30	10.3	4.5	4.0	Краснодарский край
5	04.11	17 41 20.0	44.73	37.27	4	9.4	3.9	3.4	Черное море
6	08.11	03 10 43.5	43.51	40.99	3	9.3	4.1	4.1	Карачаево-Черкесская Республика

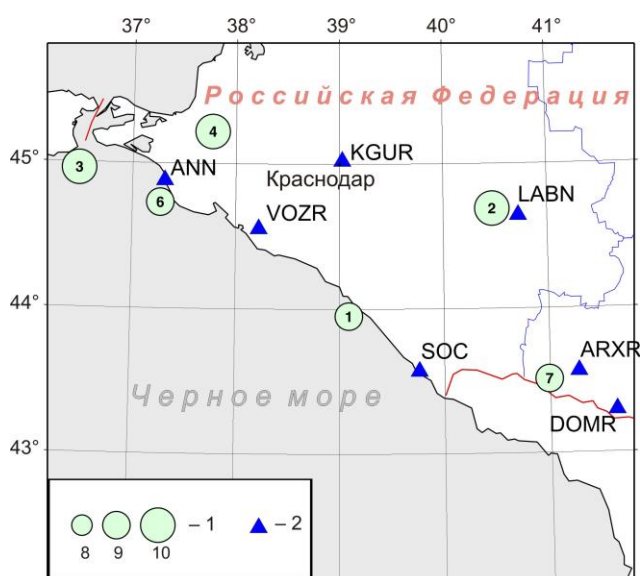


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений Северного Кавказа, для которых проведен в 2008 г. спектральный анализ

1 – энергетический класс K_p ; 2 – сейсмическая станция

Так как спектр записи реального землетрясения в точке наблюдения является суперпозицией эффектов самого источника, амплитудно-частотной характеристики регистрирующего прибора, среды на пути очаг–станция и направленности излучения, то была применена методика учета всех этих факторов при переходе от стационарного спектра к спектру источника, которая подробно изложена в [9–12]. Значение сейсмического момента в очаге землетрясения M_0 получено по формуле из [10]:

$$M_0 = \Omega_0(4\pi\rho v^3) / R_{0\varphi} \cdot G(\Delta, h) \cdot C(\omega), \quad (1)$$

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; v и ρ – скорость распространения волны и плотность пород в окрестности очага; $R_{0\varphi}$ – функция, характеризующая направленность излучения из очага на станцию; $G(\Delta, h)$ – поправка за геометрическое расхождение; $C(\omega)$ – частотная характеристика земной коры под станцией.

Для относительно слабых по магнитуде землетрясений при неизвестном механизме очага обычно принимается среднее значение $R_{0\phi}=0.4$ [12], что было сделано и в наст. ст., т.к. механизмы исследуемых очагов не удалось построить из-за недостаточного числа знаков первого движения в P -волне.

Функция геометрического расхождения $G(\Delta, h)$ для близких землетрясений на расстояниях от станции регистрации $r < 1000$ км может быть оценена как $1/r$ [13], где r – гипоцентральное расстояние. Частотная характеристика земной коры под станцией в случае отсутствия данных конкретных исследований принимается в среднем равной $C(\omega)=2$.

В станционные спектры была введена поправка $S(f)$ за неупругое затухание волны в мантии, которая рассчитывается по формуле (2) из [10]:

$$S_m(f) = e^{-t_s^* \pi f}, \text{ где} \quad (2)$$

где t_s^* – отношение времени t_s пробега S -волны до станции регистрации к средней добротности среды Q_{cp} вдоль луча по [10] равно

$$t_s^* = t_s / Q_{cp}. \quad (3)$$

Значение Q_{cp} для S -волн Северо-Западного Кавказа по записям «Сочи» и «Анапы» определено О.В. Павленко [14] и для полосы частот $\Delta f=1-8$ Гц находится из зависимостей $Q(f) \sim 80 f^{0.9}$ для «Сочи» и $\sim 130 f^{0.7}$ – для «Анапы».

Для построения спектров выбирался фрагмент записи S -волны от начала вступления до момента, когда амплитуда этой группы волн достигла примерно $1/3 A_{S \max}$ [11] (пример на рис. 2). В зависимости от удаленности станции от очага землетрясения длительность τ записи выбранных фрагментов варьировала от 25 до 60 с от вступления S -волны.

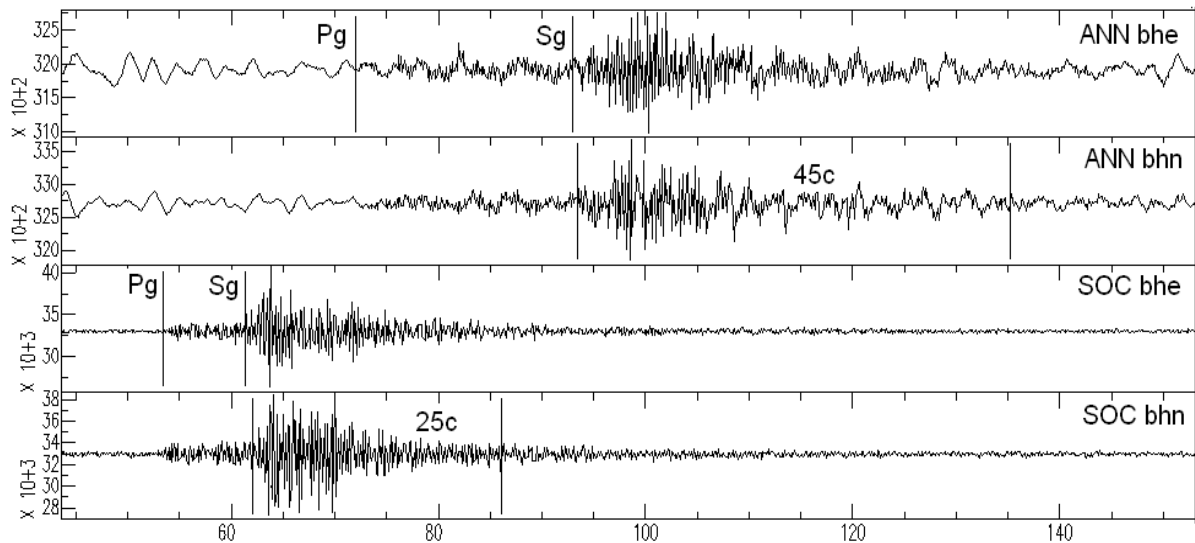


Рис. 2. Записи землетрясения 22 марта 2008 г. в 01^h35^m с $K_p=9.2$ на горизонтальных компонентах широкополосного сейсмометра СМ-3-ОС на станциях «Анапа» и «Сочи»

Спектры S -волн шести землетрясений для двух горизонтальных компонент приводятся на рис. 3. Здесь помещены спектры только тех землетрясений, для которых корректно проведены две асимптоты в соответствии с моделью Брюна [15].

Замеры спектральной амплитуды A_0 осуществлялись также для обеих горизонтальных компонент и приведены в табл. 2 вместе с вычисленными по ним сейсмическими моментами M_0 и моментными магнитудами M_w по формулам (4) Канамори из [16]:

$$M_w, \text{ дин}\cdot\text{см} = 2/3 \cdot \lg M_0 - 10.7, \quad (4 \text{ а})$$

$$M_w, \text{ Н}\cdot\text{м} = 2/3 (\lg M_0 + 7) - 10.7. \quad (4 \text{ б})$$

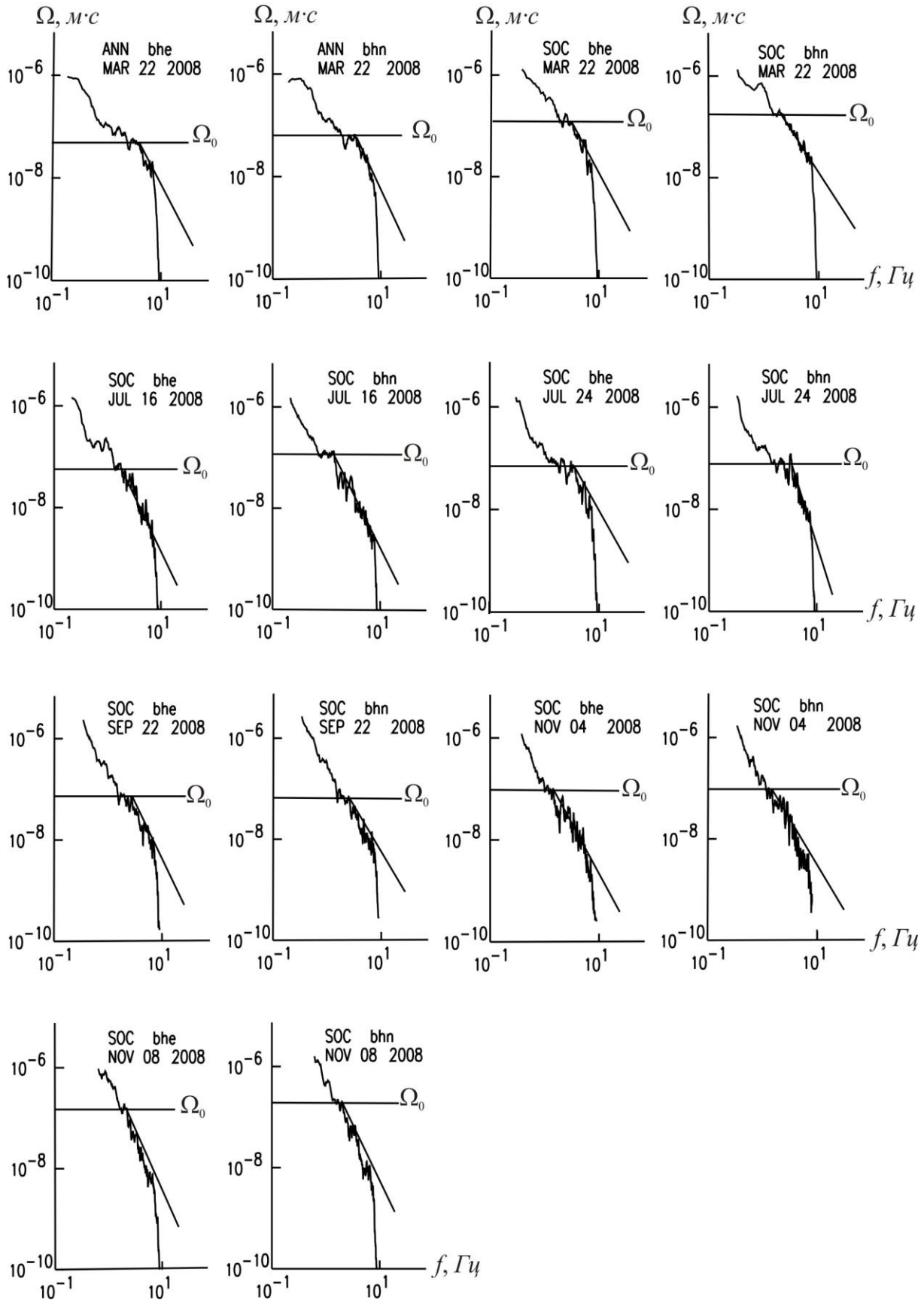


Рис. 3. Стационарные спектры на горизонтальных составляющих (BHN, BHE) станций «Сочи» и «Анапа» для землетрясений из табл. 2 (помещены спектры землетрясений, для которых проведены две асимптоты в соответствии с моделью Бруна)

Таблица 2. Значения спектральной амплитуды A_0 , скалярного сейсмического момента M_0 для шести землетрясений Северного Кавказа в 2008 г.

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	K_p	M^p	Код с/ст	Δ°	Компо- нента	A_0 , см·с	M_0 , Н·м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	22.03	01 35 58.3	9.2	2.9	ANN	1.58	BHE	0.0000285	$9.1 \cdot 10^{13}$
							BHN	0.0000309	$9.8 \cdot 10^{13}$
					SOC	0.62	BHE	0.0000302	$3.8 \cdot 10^{13}$
							BHN	0.0000287	$3.6 \cdot 10^{13}$
2	16.07	13 24 26.7	10.0	3.3	SOC	1.23	BHE	0.0000303	$7.5 \cdot 10^{13}$
							BHN	0.0000602	$1.5 \cdot 10^{14}$
3	24.07	14 14 10.3	9.9	3.3	ANN	0.70	BHE	0.000201	$2.6 \cdot 10^{14}$
							SOC	2.49	BHE
					BHN	0.000210	$1.0 \cdot 10^{15}$		
4	22.09	05 47 27.2	10.3	3.5	SOC	2.05	BHE	0.000115	$4.7 \cdot 10^{14}$
							BHN	0.000111	$4.6 \cdot 10^{14}$
5	04.11	17 41 20.0	9.4	3.0	SOC	2.13	BHE	0.000149	$6.4 \cdot 10^{14}$
							BHN	0.000149	$6.4 \cdot 10^{14}$
6	08.11	03 10 43.5	9.3	2.9	SOC	0.96	BHE	0.0000581	$1.1 \cdot 10^{14}$
							BHN	0.0000703	$1.4 \cdot 10^{14}$

Примечание. В графе 5 даны расчеты магнитуды по формуле Т.Г. Раутиан $K=4+1.8M$ [+17].

Для всех шести землетрясений (табл. 2) определены характеристики f_0 и Ω_0 амплитудных спектров в соответствии с моделью Брюна [15], которые использованы для расчета динамических параметров их очагов (табл. 3). Представлены следующие параметры очагов землетрясений: Δ – эпицентральное расстояние, Ω_0 – спектральная плотность, f_n – частота перегиба спектра; f_0 – угловая частота, M_0 – сейсмический момент, L – длина разрыва, $\Delta\sigma$ – сброшенное напряжение, $\eta\sigma$ – кажущееся напряжение, \bar{u} – средняя подвижка по разрыву.

Таблица 3. Спектральные и динамические параметры очагов землетрясений Северного Кавказа в 2008 г. (SOC, ANN: S-волны)

№	Дата, д м	Станция	Компо- нента	Δ°	Ω_0 , $10^{-6} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$	f_n , Гц	f_0 , Гц	M_0 , Н·м	M_w	L , $10^3 \cdot \text{м}$	$\Delta\sigma$, $10^6 \cdot \text{Н}/\text{м}^2$	$\eta\sigma$, $10^6 \cdot \text{Н}/\text{м}^2$	\bar{u} , м	
1	22.03	ANN	BHE	1.58	0.285	4.0	4.0	$9.1 \cdot 10^{13}$	3.3	0.6	15	5	0.01	
			BHN		0.309	3.4	3.4	$9.8 \cdot 10^{13}$	3.3	0.8	7	5	0.01	
			SOC	BHE	0.62	0.302	3.2	3.2	$3.8 \cdot 10^{13}$	3.0	0.8	3	12	0.002
				BHN		0.287	3.1	3.1	$3.6 \cdot 10^{13}$	3.0	0.8	3	13	0.002
2	16.07	SOC	BHE	1.23	0.303	2.0	2.0	$7.5 \cdot 10^{13}$	3.2	1.4	1	40	0.002	
			BHN		0.602	1.7	1.7	$1.5 \cdot 10^{14}$	3.4	1.6	1	20	0.002	
3	24.07	SOC	BHE, BHN	2.49	2.10	3.5	3.5	$1.0 \cdot 10^{15}$	4.0 4.0	0.8	68	2	0.07	
4	22.09	SOC	BHE	2.05	1.15	3.5	3.5	$4.7 \cdot 10^{14}$	3.7	0.8	32	13	0.03	
			BHN		1.11	3.5	3.5	$4.6 \cdot 10^{14}$	3.7	0.8	31	13	0.03	
5	04.11	SOC	BHE, BHN	2.13	1.49	1.8	1.8	$6.4 \cdot 10^{14}$	3.8 3.8	1.4	8	1	0.01	
6	08.11	SOC	BHE	0.96	0.581	2.2	2.2	$1.1 \cdot 10^{14}$	3.3	1.2	2	5	0.003	
			BHN		0.703	2.2	2.2	$1.4 \cdot 10^{14}$	3.4	1.2	3	4	0.004	

Очаговые параметры двух землетрясений в Керченско-Анапском районе – 24 июля в $14^{\text{h}}14^{\text{m}}$ и 22 сентября в $05^{\text{h}}47^{\text{m}}$, также определены по данным станций Крымской сети [17/18]. Представляет интерес сравнение полученных параметров по данным Северного Кавказа и Крыма (табл. 4). Следует отметить, что станции Крымской сети оснащены в основном короткопериодным оборудованием [19] в отличие от станций «Сочи» и «Анапа», где установлено ши-

рокопосное оборудование (СМ-3-ОС+SDAS), поэтому следовало бы ожидать различий в спектральных параметрах Ω_0 и f_0 .

Таблица 4. Сравнение спектральных и динамических параметров очагов землетрясений 24 июля и 22 сентября 2008 г. по данным авторов настоящей статьи и [17]

Станция	Составляющая	Δ , км	$\Omega_0 \cdot 10^{-6}$, м·с	f_0 , Гц	$M_0 \cdot 10^{13}$, Н·м	M_w	r_0 , км	$\Delta\sigma \cdot 10^5$, Н·м ²	$\varepsilon \cdot 10^{-6}$	$\bar{u} \cdot 10^{-2}$, м
Землетрясение 24 июля: [8] $t_0=14^h14^m10.3^s$, $\varphi=44.96^\circ$, $\lambda=36.48^\circ$, $h=34$ км, $K_p=9.9$ [17] $t_0=14^h14^m11.2^s$, $\varphi=44.87^\circ$, $\lambda=36.37^\circ$, $h=25$ км, $K_{II}=10.1$ $K_{II}=10.1$										
Сочи	ВНЕ	276	2.1	3.5	100.0	4.0	0.4	680		7.00
	ВНН									
Керчь		49	3.9	1.3	42.4	3.7	1.03	1.69	5.64	0.42
Землетрясение 22 сентября: [8] $t_0=05^h47^m27.2^s$, $\varphi=45.22^\circ$, $\lambda=37.77^\circ$, $h=30$ км, $K_p=10.3$ [17] $t_0=05^h47^m27.2^s$, $\varphi=44.84^\circ$, $\lambda=37.78^\circ$, $h=45$ км, $K_{II}=9.9$ $K_{II}=9.9$										
Сочи	ВНЕ	210	1.15	3.5	47	3.7	0.4	320		3.00
	ВНН	210	1.11	3.5	46	3.7	0.4	310		3.00
Судак	Z	219	0.025	3.8	14.4	3.4	0.65	2.33	7.76	0.36
	N+E	219	0.09	2.5	9.9	3.3	0.57	2.39	7.96	0.33
S					11.9	3.35	0.61	2.36	7.86	0.34
δS					0.081	0.05	0.029	0.006	0.006	0.019

Сравнение спектральных параметров. Установлено, что различия в значениях Ω_0 незначительны для землетрясения 24 июля (по станции «Сочи» $\Omega_0=2.10 \cdot 10^{-6}$ м·с, по станции «Керчь» $\Omega_0=3.9 \cdot 10^{-6}$ м·с и довольно существенны для землетрясения 22 сентября: «Судак» – $\Omega_0=0.025 \cdot 10^{-6}$ м·с (Z) и $\Omega_0=0.09 \cdot 10^{-6}$ м·с (N) и «Сочи» $\Omega_0=1.15-1.11 \cdot 10^{-6}$ м·с. Это вызывает сомнение, т.к. инструментальные энергетические оценки землетрясений 24 июля и 22 сентября близки: $K_p=9.9$ и 10.3 ; $K_{II}=10.1$ и 9.9 соответственно. Эти различия привели к значимым различиям в значениях M_w по станциям «Керчь» и «Судак» для этих землетрясений ($M_w=3.7$ и $M_w=3.35$). Определения M_w для этих двух землетрясений по станции «Сочи» превышают крымские на 0.3 единицы. Причинами различий могут быть разные методики введения поправок при получении очагового спектра, например за неупругое затухание волны в мантии, учет среднего или конкретно рассчитанного значения направленности излучения для P- и S-волн, а также разные значения скорости распространения сейсмической волны при расчете M_0 . В наст. ст. применяется значение $v_s=3.5$ км/с.

Значения угловой частоты спектра f_0 для землетрясения 22 сентября близки по станциям «Судак» и «Сочи». Они находятся на почти равных расстояниях (219 и 227 км соответственно), но в различных азимутальных направлениях от эпицентра землетрясения.

А вот для землетрясения 24 июля такого результата не получено, т.к. по спектру станции «Анапа» не удалось корректно провести асимптоту по короткопериодной части спектра, а станция «Сочи» находится на большем расстоянии, чем «Керчь» (276 км вместо 49 км). По этой причине их спектры могут существенно различаться. Однако следует обратить внимание на небольшое значение ($f_0=1.3$ Гц) угловой частоты спектра f_0 по спектру «Керчи» в сравнении с «Сочи» ($f_0=3.5$ Гц). Вероятно, это связано с какими-то местными условиями под станцией «Керчь» или со специфическими аппаратными особенностями ее оснащения. По материалам предыдущих сборников замечено, что станция «Керчь» отличается более низкими значениями f_0 и относительно других крымских станций.

Сравнение динамических параметров этих двух землетрясений указывает на более значимые различия. Особенно это видно в значениях сброшенного напряжения $\Delta\sigma$, которое по данным станции «Сочи» на два порядка выше, чем по данным станций «Керчь» и «Судак». В соответствии с методикой [10], для разрыва круговой формы радиуса r сброшенное напряжение определено формулой

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{r_0^3}, \quad (5)$$

согласно которой даже небольшое уменьшение радиуса r_0 круговой площадки может существенно увеличить сброшенное напряжение $\Delta\sigma$. Значение радиуса r круговой площадки рассчитывается по формуле

$$r = 2.34 \frac{V_s}{2\pi f_0}, \quad (6)$$

т.е. находится в обратной зависимости от значения угловой частоты f_0 . Частота f_0 связана с длительностью импульса, излученного из очага, которая в свою очередь определяется размером очага, скоростью испарывания и положением точки наблюдения по отношению к источнику. Вероятно, особенности положения различных станций сказываются таким образом.

Следует заметить, что, несмотря на указанные выше различия в динамических параметрах, все значения лежат, тем не менее, в пределах, установленных в [20] для Кавказа. Так, согласно формуле расчета сброшенного напряжения в виде

$$\lg Ds \pm 0.3 = 0.015 + 0.310 \text{ ЧК}, \quad (7)$$

значения $\Delta\sigma$ могут лежать при $K=10$ в интервале $\Delta\sigma=653\text{--}2600$ бар. Учитывая соотношение единиц $1 \text{ бар}=10^5 \text{ Па}$, имеем из табл. 4 $\Delta\sigma=680$ бар для землетрясения 24 июля и 320 бар – для землетрясения 22 сентября. Эти значения $\Delta\sigma$ находятся вблизи нижнего предела разброса возможных значений сброшенного напряжения для землетрясений Кавказа.

Л и т е р а т у р а

1. **Малянова Л.С., Габсатарова И.П.** Спектральные и очаговые параметры Пшехского землетрясения в Краснодарском крае // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 268–271.
2. **Габсатарова И.П.** Пшехское землетрясение 15 ноября 2004 года с $M_w=4.6$, $M_S=4.6$, $I_0^p=5\text{--}6$ (Краснодарский край) // Землетрясения Северной Евразии, 2004 год. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 386–394.
3. **Малянова Л.С., Габсатарова И.П.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии, 2005 год. – Обнинск: ГС РАН, 2011. – С. 268–271.
4. **Габсатарова И.П., Малянова Л.С.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии, 2006 год. – Обнинск: ГС РАН, 2012. – С. 286–291.
5. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2008 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2008. – URL: http://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2008/.
6. **Bulletin of the International Seismological Centre for 2008.** – Thatcham, United Kingdom: ISC, 2010. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
7. **Чепкунас Л.С., Малянова Л.С.** Очаговые параметры сильных землетрясений Земли. (См. раздел II (Спектры и динамические параметры очагов землетрясений) в наст. сб.).
8. **Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Головкина Л.В., Асманов О.А., Девяткина Л.В. (отв. сост.), Александрова Л.И., Амиров С.Р., Иванова Л.Е., Малянова Л.С., Лещук Н.М., Мусаллаева З.А., Сагателова Е.Ю., Гамидова А.М., Абдуллаева А.Р., Котляренко Н.Л., Никольская Т.Н., Яфимова Я.П., Киселева О.А., Цирихова Г.В., Калоева И.Ю. (сост.).** Каталог землетрясений ($N=1937$) и взрывов ($N=31$) Северного Кавказа за 2008 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
9. **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.
10. **Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И. и др.** 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.
11. **Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.Г.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
12. **Пустовитенко Б.Г.** Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма. Дис. на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. – Киев: ИГ НАНУ, 2003. – С. 58–71.

13. **Anderson D.L., Hart R.S.** Q of the Earth // J. Geophys. Res. – 1978. – **83**. – N B12. – P. 5869–5882.
14. **Павленко О.В.** Изучение закономерностей излучения и распространения сейсмических волн в коре и верхней мантии Северного Кавказа по записям сейсмостанций «Сочи» и «Анапа» // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Пятой Международной сейсмологической школы, г. Владикавказ. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 138–142.
15. **Brune I.V.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – **75**. – N 26. – P. 4997–5009.
16. **Hanks T.S., Kanamori H.** A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**. – N 135. – P. 2348–2350.
17. **Раутиан Т.Г.** Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
18. **Пустовитенко Б.Г., Калинюк И.В., Мерзей Е.А., Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н.** Динамические параметры очагов землетрясений Крыма. (См. раздел II (Спектры и динамические параметры очагов землетрясений) в наст сб.).
19. **Свидлова В.А., Пустовитенко А.А., Пасынков Г.Д.** Крым. (См. раздел I (Обзор сейсмичности) в наст. сб.).
20. **Ризниченко Ю.В., Джибладзе Э.А., Болквандзе И.Н.** Спектры колебаний и параметры очагов Кавказа // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 74–86.