

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА

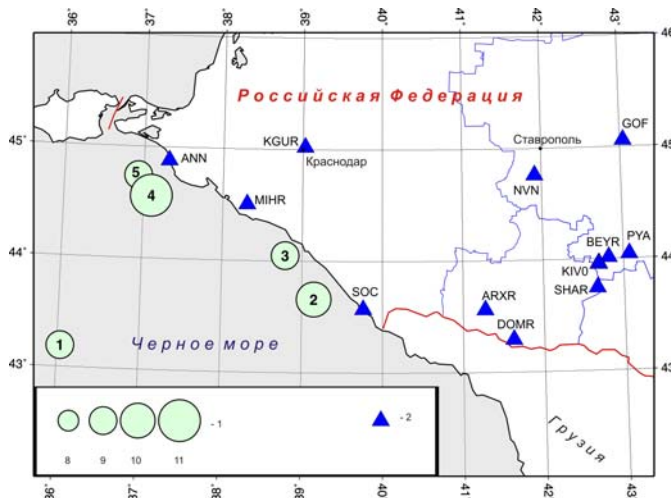
И.П. Габсатарова, Л.С. Малянова

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

Для пяти землетрясений Северного Кавказа (табл. 1, рис. 1) построены спектры по записям станций «Сочи» и «Анапа» с использованием методики [1], примененной ранее [2–4] в этом же регионе. Все события локализованы вблизи Черноморского побережья Российской Федерации.

**Таблица 1.** Список землетрясений Северного Кавказа, для которых рассчитаны спектры в 2007 г.

№	Дата, д м	$t_0$ , ч мин с	Эпицентр		$h$ , км	$K_p$	MPVA [5]	Район
			$\varphi^\circ, N$	км				
1	20.04	05 08 21.4	43.19	36.04	18	9.3	4.0	Черное море
2	31.05	21 47 18.0	43.66	39.15	11	10.0	4.5	Черное море
3	02.06	19 14 00.4	44.05	38.79	20	9.3	4.4	Черное море
4	05.10	23 17 56.1	44.56	37.10	23	10.7	4.7	Черное море
5	07.11	00 20 20.8	44.74	36.93	15	8.7	3.8	Черное море



**Рис. 1.** Карта эпицентров землетрясений Северного Кавказа, для которых проводился в 2007 г. спектральный анализ

1 – энергетический класс  $K_p$ ; 2 – сейсмическая станция

$R_{\theta\varphi}$  – 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  $R_{\theta\varphi}=0.4$  [9]. Функция геометрического расхождения  $G(\Delta, h)$  для близких землетрясений на расстояниях от станции регистрации  $r < 1000$  км может быть оценена как  $1/r$ , где  $r$  – гипоцентральное расстояние [10]. Частотная характеристика земной коры под станцией принимается в среднем равной  $C(\omega)=2$  в случае отсутствия данных кон-

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 работах [6–9]. Значение сейсмического момента в очаге землетрясения  $M_0$  получено по формуле:

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

где  $\Omega_0$  – максимальное значение спектральной плотности при  $\omega \rightarrow 0$ ;  $v$  и  $\rho$  – скорость распространения волны и плотность пород в окрестности очага;

кретных исследований. Кроме того, в стационарный спектр введена поправка  $S(f)$  за неупругое затухание волны в мантии, которая рассчитывается по формуле:

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

где  $t_s^*$  – отношение времени  $t_s$  пробега  $S$ -волны до станции регистрации к средней добротности среды  $Q_{cp}$  вдоль луча по [10]. Значение  $Q_{cp}$  для  $S$ -волн Северо-Западного Кавказа по записям станций «Сочи» и «Анапа» определено О.В. Павленко [11] и находится для полосы частот  $\Delta f=1-8$  Гц из зависимостей  $Q(f) \sim 80 f^{0.9}$  для станции «Сочи» и  $\sim 130 f^{0.7}$  – для станции «Анапа».

Для построения спектров выбирался фрагмент записи  $S$ -волны от начала вступления до момента, когда амплитуда этой группы волн достигла примерно  $1/3 A_{S \max}$  [8] (пример на рис. 2). В зависимости от удаленности станции от очага землетрясения длительность  $\tau$  записи выбранных фрагментов варьировала от 20 до 70 с от вступления  $S$ -волны.

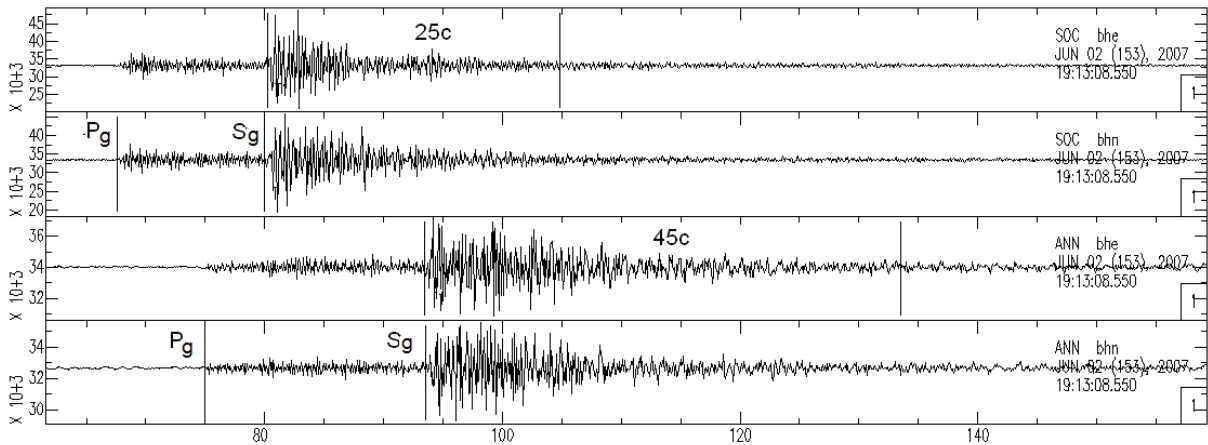


Рис. 2. Записи землетрясения 2 июня 2007 г. в 19<sup>h</sup>14<sup>m</sup> с  $K_p=9.3$  на горизонтальных компонентах широкополосного сейсмометра SM-3-OC на станциях «Сочи» и «Анапа»

Спектры  $S$ -волн пяти землетрясений приводятся на рис. 3 для двух горизонтальных компонент.

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 Канамори [12]:

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

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

Таблица 2. Значения спектральной амплитуды  $A_0$ , скалярного сейсмического момента  $M_0$  и магнитуды Канамори  $M_w$  для пяти землетрясений Северного Кавказа в 2007 г.

№	Дата, д м	$K_p$	Станция	$\Delta^\circ$	Ком-п-нента	$A_0$ , см/с	$M_0$ , H·м	$M_w$	№	Дата, д м	$K_p$	Станция	$\Delta^\circ$	Ком-п-нента	$A_0$ , см/с	$M_0$ , H·м	$M_w$
1	20.04	9.3	ANN	1.92	BHE	0.000106	$4.1 \cdot 10^{14}$	3.7	4	05.10	10.7	ANN	0.36	BHE	0.0001670	$2.8 \cdot 10^{14}$	3.6
					BHN	0.0000991	$3.8 \cdot 10^{14}$	3.7						BHN	0.0001500	$2.6 \cdot 10^{14}$	3.6
			SOC	2.74	BHE	0.000413	$2.3 \cdot 10^{15}$	4.2				SOC	2.16	BHE	0.0016100	$7.0 \cdot 10^{15}$	4.5
					BHN	0.000382	$2.1 \cdot 10^{15}$	4.2						BHN	0.001610	$7.0 \cdot 10^{15}$	4.5
2	31.05	10.0	ANN	1.80	BHE	0.000234	$8.5 \cdot 10^{14}$	3.9	5	07.11	8.7	ANN	0.31	BHE	0.000129	$8.0 \cdot 10^{13}$	3.2
					BHN	0.000262	$9.5 \cdot 10^{14}$	3.9						SOC	2.35	BHE	0.0000394
			SOC	0.45	BLE	0.0000446	$4.0 \cdot 10^{13}$	3.0				BHN	0.0000935			$5.8 \cdot 10^{13}$	3.1
					BLN	0.0000575	$5.2 \cdot 10^{13}$	3.1						BHN	0.0000421	$2.0 \cdot 10^{14}$	3.5
3	02.06	9.3	ANN	1.34	BHE	0.0000900	$2.4 \cdot 10^{14}$	3.6									
					BHN	0.0001110	$3.0 \cdot 10^{14}$	3.6									

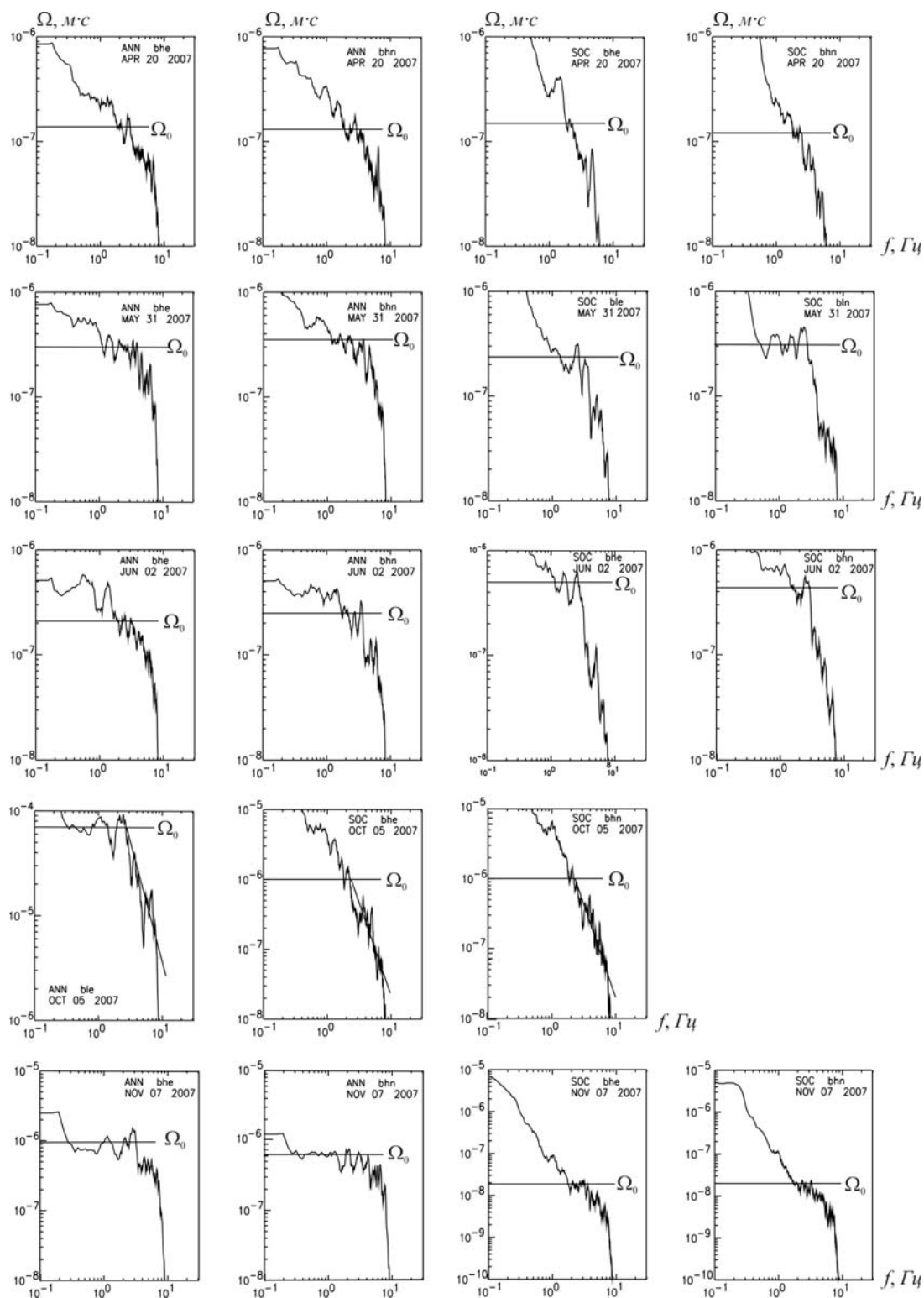


Рис. 3. Стационарные спектры на горизонтальных составляющих (BHN, BHE) станций «Сочи» и «Анапа» для землетрясений из табл. 2

Характеристики  $f_0$  и  $\Omega_0$  амплитудных спектров удалось определить однозначно лишь для землетрясения 5 октября в  $23^{\text{h}}17^{\text{m}}$  с  $K_p=10.7$ . Они использованы для расчета динамических параметров очага этого землетрясения табл. 3. Представлены следующие параметры очагов землетрясений:  $\Delta$  – эпицентральное расстояние,  $\Omega_0$  – спектральная плотность,  $f_0$  – 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 землетрясения 5 октября 2007 г. по записям станций «Сочи» и «Анапа»

№	Дата, д м	С/ст	Компо- нента	$\Delta^\circ$	$\Omega_0,$ $10^{-5} \text{ м}\cdot\text{с}$	$f_0,$ $\text{Гц}$	$M_0,$ $10^{15} \text{ Н}\cdot\text{м}$	$M_w$	$L,$ $10^3 \text{ м}$	$\Delta\sigma,$ $10^6 \text{ Н/м}^2$	$\bar{\eta}\sigma,$ $10^6 \text{ Н/м}^2$	$\bar{u},$ $\text{м}$	
4	05.10	ANN	BLE	0.36	10.4	2.7	7.5	4.5	1.0	26	2	0.32	
			SOC	ВНЕ	2.16	1.61	2.3	7.0	4.5	1.2	14	2	0.20
				ВНН		1.61	2.3	7.0	4.5	1.2	14	2	0.20
Среднее геометрическое или арифметическое (*)							7.16	4.5*	1.13	17.21	2.00	0.23	

Сравнение очаговых параметров землетрясения 5 октября с аналогичными величинами, полученными в настоящем сборнике по станциям Крыма [13], показывает, что имеются следующие различия:

1.  $M_0$  по станциям «Сочи» и «Анапа» примерно в два раза больше, чем по станциям «Судак», «Ялта», «Феодосия», «Керчь» ( $7.6 \cdot 10^{15} \text{ Н}\cdot\text{м}$  вместо  $3.44 \cdot 10^{15} \text{ Н}\cdot\text{м}$  [13]), что привело к различным оценкам  $M_w=4.5$ , против  $M_w=4.3$ . В то же время оба значения  $M_0$  примерно на порядок выше, чем расчетные значения  $M_0$  по формулам  $\lg M_0=f(K)$  для Крыма [14], Кавказа [15] и мира [16]:

$$\lg M_0 = 15.14 + 0.645 K, \quad (4)$$

$$\lg M_0 = 14.50 + 0.650 K, \quad (5)$$

$$\lg M_0 = 11.84 + 0.889 K \quad (6)$$

соответственно, которые при  $K=10.7$  имеют  $\lg M_0 - 21.455, 21.352, 22.041$ , а значит  $M_0=2.85 \cdot 10^{14}, 2.25 \cdot 10^{14}, 1.10 \cdot 10^{15} \text{ Н}\cdot\text{м}$  соответственно, тогда как в табл. 3 для землетрясения 5 октября имеем  $M_0=7.16 \cdot 10^{15} \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

2. Значения радиуса круговой дислокации  $r_0$  или длина разрыва  $L=2r_0$ , также различаются примерно в два раза, но теперь по крымским данным это значение больше в два раза, что зависит от значения частоты  $f_0$ , в [13] она изменяется от станции к станции от 1.02 до 2.1 Гц, у нас она смещена в область более высоких частот – 2.2–2.7 Гц, т.к. для расчета среднего радиуса  $R$  эквивалентной по площади круговой дислокации в очаге пользовались формулой Брюна:

$$R = \frac{2.34 \cdot V}{2\pi f_0},$$

где  $V$  – скорость  $P$ -волны.

3. Средняя подвижка  $\bar{u}$  по разрыву на порядок больше, чем по данным крымских станций.

4. Имеются различия и в величинах сброшенного напряжения  $\Delta\sigma$ .

Но все эти различия лежат практически в пределах возможных погрешностей определения величин очаговых параметров, к тому же возможно, что волновая картина землетрясений Черноморской зоны в различных азимутах имеет различный частотный состав, что не может не отразиться на спектральных характеристиках. Однако для более обоснованных выводов следует накопить статистически представительный ряд данных.

#### 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  $M_w=4.6, M_S=4.6, I_0^p=5-6$  (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. Габсатарова И.П., Селиванова Е.А., Головкова Л.В., Амиров С.Р., Девяткина Л.В. (отв. сост.), Александрова Л.И., Иванова Л.Е., Малянова Л.С., Асманов О.А., 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. Каталог землетрясений ( $N=1028$ ) и взрывов ( $N=36$ ) Северного Кавказа за 2007 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
6. 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.
7. 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.
8. Пустовитенко Б.Г., Пантелеева Т.Г. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Крыма. – Киев: Наукова думка, 1990. – 251 с.
9. Пустовитенко Б.Г. Сейсмические процессы в Черноморском регионе и сейсмическая опасность Крыма. Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. – Киев: ИГ НАНУ, 2003. – С. 58–71.
10. Anderson D.L., Hart R.S. Q of the Earth // J. Geophys. Res. – 1978. – **83**. – N B12. – P. 5869–5882.
11. 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, Владикавказ, 4–8 октября 2010 г. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 138–142.
12. Hanks T.S., Kanamori H. A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**. – N 135. – P. 2348–2350.
13. Пустовитенко Б.Г., Мержей Е.А., Поречнова Е.И., Сыкчина З.Н. Очаговые параметры землетрясений Крыма. (См. раздел II (Спектры и динамические параметры очагов землетрясений) в наст. сб.).
14. 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.
15. Ризниченко Ю.В., Джибладзе Э.А., Болквадзе И.Н. Спектры колебаний и параметры очагов Кавказа // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 74–86.
16. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. – М.: Наука, 1976. – С. 9–27.