

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
СЕВЕРНОГО КАВКАЗА**

Л.С. Малянова, И.П. Габсатарова

Геофизическая служба РАН, г. Обнинск, lmal@gstras.ru, ira@gstras.ru

Для десяти землетрясений Северного Кавказа (табл. 1) построены спектры по записям станций «Сочи» и «Кисловодск» с использованием методики [1], примененной ранее [2–5] в этом же регионе. В отличие от данных в 2008 г. [6]

э лишь одно из анализируемых землетрясений произошло в западной, остальные в центральной зонах. Одно из них произошло в приграничном районе Грузии 7 сентября 2009 г. в $22^{\text{h}}41^{\text{m}}$ с $K_p=14.3$ [7], $M_S=5.8$ [8], $M_w=6.0$ [9] и сопровождалось афтершоками. Оно описано в отдельной статье наст. сб. как Онийское-II [10]. Спектральные и очаговые параметры этого землетрясения и семи его сильнейших афтершоков приводятся также в табл. 1.

Таблица 1. Список землетрясений Северного Кавказа, для которых рассчитаны спектры в 2009 г.

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	K_p	Район
			φ°, N	λ°, E			
1	22.03	02 46 39.6	44.71	37.48	39	9.4	Краснодарский край
2	07.09	22 41 36.4	42.56	43.38	6	14.2	Грузия
3	07.09	22 49 29.7	42.54	43.52	7	12.3	Грузия
4	07.09	23 21 03.3	42.61	43.42	6	11.2	Грузия
5	07.09	23 33 50.7	42.61	43.53	10	10.6	Грузия
6	08.09	17 50 48.3	42.54	43.43	1	11.2	Грузия
7	09.09	08 36 17.5	42.53	43.53	6	11.5	Грузия
8	09.09	09 44 21.6	42.53	43.57	9	10.7	Грузия
9	12.09	09 41 19.3	42.53	43.44	11	11.3	Грузия
10	12.10	23 26 02.2	43.77	42.98	16	9.3	Кабардино-Балкария

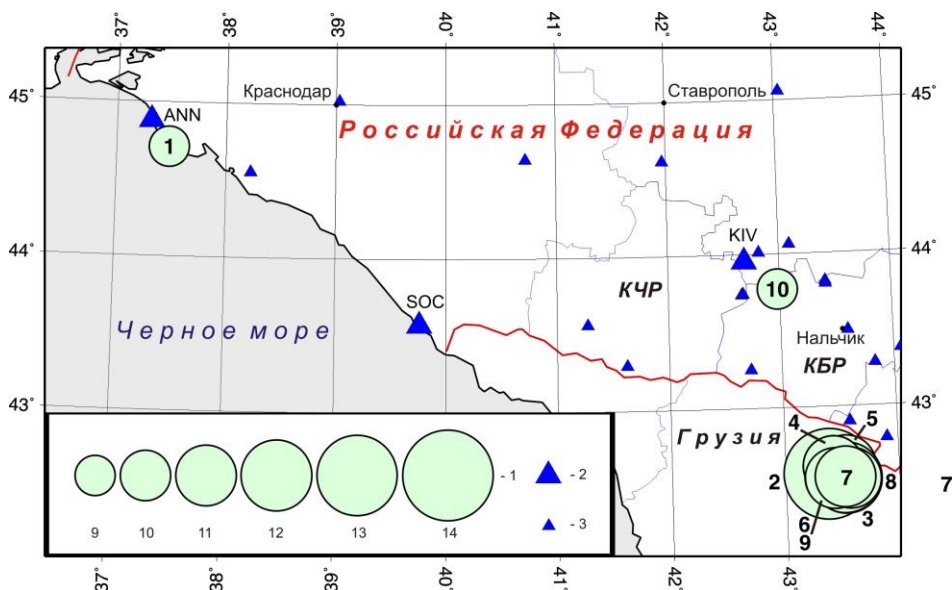


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2009 г., для которых проведен спектральный анализ

1 – энергетический класс K_p ; 2 – широкополосная сейсмическая станция опорной сети; 3 – короткопериодная станция региональной сети.

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 станционного спектра к спектру источника, которая подробно изложена в [11–13]. Значение сейсмического момента в очаге землетрясения M_0 получено по формуле из [12]:

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

где Ω_0 – максимальное значение спектральной плотности при $\omega \rightarrow 0$; v и ρ – скорость распространения волны и плотность пород в окрестности очага; $R_{0\phi}$ – 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 $R_{0\phi}=0.6$ [14], 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 $1/r$ [15], где r – гипоцентральное расстояние. Частотная характеристика земной коры под станцией принимается в среднем равной $C(\omega)=2$ в случае отсутствия данных конкретных исследований.

В станционные спектры были введены поправки $S(f)$ за неупругое затухание волны в мантии, которая рассчитывается по формуле (2) из [13]:

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

где t_s^* – отношение времени t_s пробега S -волны до станции регистрации к средней добротности среды Q_{cp} вдоль луча по [13] равно

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

Значение Q_{cp} для S -волн Северо-Западного Кавказа по записям «Сочи» и «Кисловодск» определено О.В. Павленко [16] и находится для полосы частот $\Delta f=1-8$ Гц из зависимостей $Q(f) \sim 80 f^{0.9}$ для «Сочи» и $\sim 85 f^{0.9}$ – для «Кисловодска».

Для построения спектров выбирался фрагмент записи S -волны от начала вступления до момента, когда амплитуда этой группы волн достигла примерно $1/3 A_{S \max}$ [15] (пример на рис. 2). В зависимости от удаленности станции от очага землетрясения длительность τ записи выбранных фрагментов варьировала от 70 до 90 с от вступления S -волны.

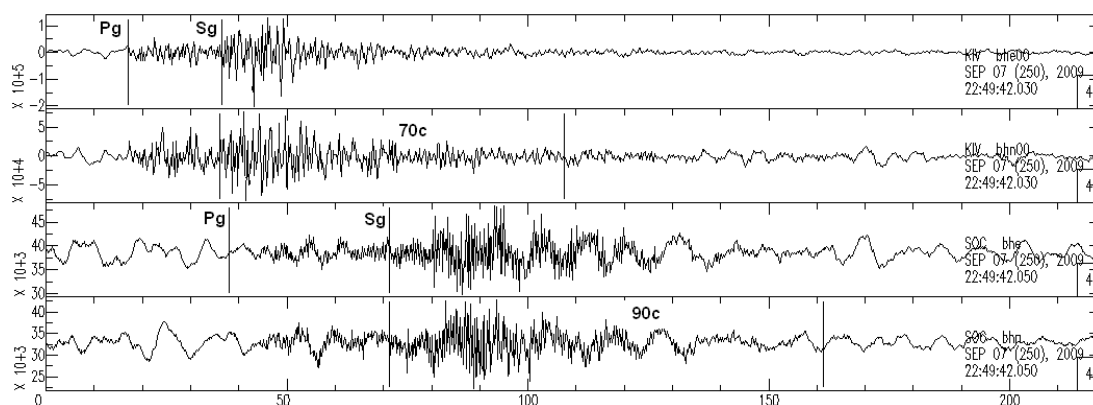


Рис. 2. Записи землетрясения 7 сентября 2009 г. в 22^h49^m с $K_p=12.3$ на горизонтальных компонентах широкополосного сейсмометра SM-3-OC на станциях «Кисловодск» и «Сочи»

Спектры S -волн станции «SOC» десяти 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 [17].

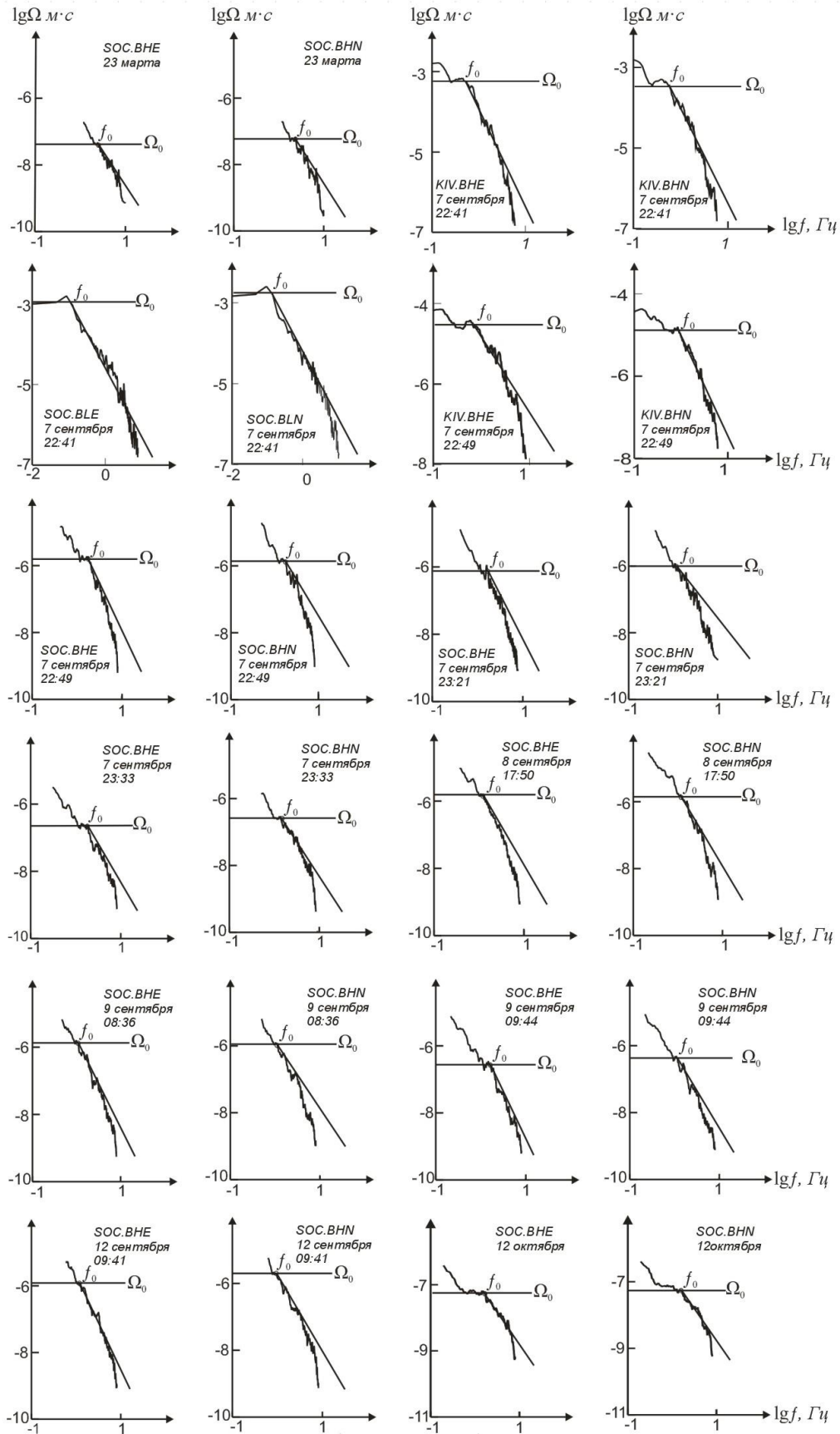


Рис. 3. Станционные спектры на горизонтальных составляющих (BHN, BHE, BLN, BLE) станций «Сочи» и «Кисловодск» для землетрясений из табл. 2 (помещены спектры землетрясений, для которых проведены две асимптоты в соответствии с моделью Бруна)

Замеры спектральной амплитуды Ω_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 [18]:

$$M_w = 2/3 (\lg M_0 + 7) - 10.7. \quad (4)$$

Таблица 2. Значения спектральной амплитуды Ω_0 , скалярного сейсмического момента M_0 для десяти землетрясений Северного Кавказа в 2009 г.

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	K_p	Код с/ст	Δ°	Компонента	Ω_0 , м·с	M_0 , Н·м
1	23.03	02 46 39.6	9.4	SOC	2.00	BHE	0.000000476	$1.3 \cdot 10^{14}$
						BHN	0.000000588	$1.6 \cdot 10^{14}$
2	07.09	22 41 36.4	14.2	SOC	2.84	BLE	0.01469	$5.6 \cdot 10^{18}$
						BLN	0.02488	$9.4 \cdot 10^{18}$
				KIV	1.48	BHE	0.0276	$5.5 \cdot 10^{17}$
						BHN	0.0256	$5.1 \cdot 10^{17}$
3	07.09	22 49 29.7	12.3	SOC	2.94	BHE	0.0000516	$2.0 \cdot 10^{16}$
						BHN	0.0000476	$1.9 \cdot 10^{16}$
				KIV	1.54	BHE	0.000178	$3.7 \cdot 10^{16}$
						BHN	0.0000743	$1.5 \cdot 10^{16}$
4	07.09	23 21 03.3	11.2	SOC	2.84	BHE	0.0000213	$8.1 \cdot 10^{15}$
						BHN	0.0000314	$1.0 \cdot 10^{16}$
5	07.09	23 33 50.7	10.6	SOC	2.92	BHE	0.00000664	$2.6 \cdot 10^{15}$
						BHN	0.00000744	$2.9 \cdot 10^{15}$
6	08.09	17 50 48.3	11.2	SOC	2.88	BHE	0.0000438	$1.7 \cdot 10^{16}$
						BHN	0.0000432	$1.7 \cdot 10^{16}$
7	09.09	08 36 17.5	11.5	SOC	2.95	BHE	0.0000401	$1.6 \cdot 10^{16}$
						BHN	0.0000316	$1.2 \cdot 10^{16}$
8	09.09	09 44 21.6	10.7	SOC	2.84	BHE	0.00000819	$3.1 \cdot 10^{15}$
						BHN	0.0000108	$4.1 \cdot 10^{15}$
9	12.09	09 41 19.3	11.3	SOC	2.89	BHE	0.0000299	$1.2 \cdot 10^{16}$
						BHN	0.0000500	$1.9 \cdot 10^{16}$
10	12.10	23 26 02.2	9.3	SOC	2.34	BHE	0.00000103	$3.2 \cdot 10^{14}$
						BHN	0.000000908	$2.9 \cdot 10^{14}$

Для всех десяти землетрясений из табл. 2 определены характеристики амплитудных спектров f_0 и Ω_0 в соответствии с моделью Брюна [17], которые использованы для расчета динамических параметров их очагов и M_w (табл. 3). Представлены следующие параметры очагов землетрясений: Δ – эпицентральное расстояние, Ω_0 – спектральная плотность, f_p – 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 2009 г. (S-волны)

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Код с/ст	Компо- нента	Δ°	Ω_0 , $10^{-6} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$	f_p , Гц	f_0 , Гц	M_0 , Н·м	M_w	L , $10^3 \cdot \text{м}$	$\Delta\sigma$, $10^5 \cdot \text{Н}/\text{м}^2$	$\eta\sigma$, $10^5 \cdot \text{Н}/\text{м}^2$	\bar{u} , м
1	23.03	02 46 39.6	SOC	BHE	2.00	0.476	2.5	2.5	$1.3 \cdot 10^{14}$	3.4	1.0	5	6	0.01
				BHN		0.588	2.5	2.5	$1.6 \cdot 10^{14}$	3.4	1.0	6	5	0.01
2	07.09	22 41 36.4	SOC	BLE	2.84	14690	0.13	0.13	$5.6 \cdot 10^{18}$	6.4	20	24	8	0.59
				BLN		24880	0.15	0.15	$9.4 \cdot 10^{18}$	6.6	17.4	62	5	1.32
			KIV	BHE	1.48	2760	0.6	0.6	$5.5 \cdot 10^{17}$	5.8	4.4	225	86	1.21
				BHN		2560	0.6	0.6	$5.1 \cdot 10^{17}$	5.8	4.4	210	93	1.12
3	07.09	22 49 29.7	SOC	BHE	2.94	51.6	2.0	2.0	$2.0 \cdot 10^{16}$	4.8	1.2	400	30	0.59
				BHN		47.6	2.0	2.0	$1.9 \cdot 10^{16}$	4.8	1.2	380	32	0.56

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Код с/ст	Компо- нента	Δ°	Ω_0 , $10^{-6}\cdot\text{м}\cdot\text{с}$	f_p , Гц	f_0 , Гц	M_0 , Н·м	M_w	L , $10^3\cdot\text{м}$	$\Delta\sigma$, $10^5\cdot\text{Н}/\text{м}^2$	$\bar{\eta}\sigma$, $10^5\cdot\text{Н}/\text{м}^2$	\bar{u} , м
3	07.09	22 49 29.7	KIV	VHE	1.54	178	0.6	0.6	$3.7\cdot 10^{16}$	5.0	4.4	33	16	0.08
				BHN		74.3	1.0	1.0	$1.5\cdot 10^{16}$	4.8	2.6	30	40	0.09
4	07.09	23 21 03.3	SOC	VHE	2.84	21.3	1.8	1.8	$8.1\cdot 10^{15}$	4.6	1.4	100	6	0.18
				BHN		27.0	1.4	1.4	$1.0\cdot 10^{16}$	4.6	1.8	60	5	0.13
5	07.09	23 33 50.7	SOC	VHE	2.92	6.64	2.0	2.0	$2.6\cdot 10^{15}$	4.2	1.3	52	5	0.06
				BHN		7.44	1.5	1.5	$2.9\cdot 10^{15}$	4.3	1.7	17	4	0.04
6	08.09	17 50 48.3	SOC	VHE	2.88	43.8	1.6	1.6	$1.7\cdot 10^{16}$	4.8	1.6	142	3	0.28
				BHN		43.2	1.5	1.5	$1.7\cdot 10^{16}$	4.8	1.8	102	3	0.22
7	09.09	08 36 17.5	SOC	VHE	2.95	40.1	1.2	1.2	$1.6\cdot 10^{16}$	4.8	2.2	52	6	0.14
				BHN		31.6	1.2	1.2	$1.2\cdot 10^{16}$	4.7	2.2	39	8	0.10
8	09.09	09 44 21.6	SOC	VHE	2.84	8.19	1.8	1.8	$3.1\cdot 10^{15}$	4.3	1.4	40	5	0.07
				BHN		10.8	1.3	1.3	$4.1\cdot 10^{15}$	4.4	2.0	18	4	0.04
9	12.09	09 41 19.3	SOC	VHE	2.89	29.9	1.2	1.2	$1.2\cdot 10^{16}$	4.7	2.2	39	5	0.10
				BHN		50.0	1.1	1.1	$1.9\cdot 10^{16}$	4.8	2.4	48	3	0.14
10	12.10	23 26 02.2	SOC	VHE	2.34	1.03	2.0	2.0	$3.2\cdot 10^{14}$	3.6	1.3	5	2	0.01
				BHN		0.908	1.8	1.8	$2.9\cdot 10^{14}$	3.6	1.4	4	2	0.01

Для сильнейшего в 2009 г. Онийского землетрясения 7 сентября в 22^h41^m получены различные оценки M_0 и M_w по станциям «Сочи» и «Кисловодск», но среднее значение M_w составило 6.1, что близко к данным GСMT: $M_0 = 1.16\cdot 10^{18}$, $M_w=6.0$.

Оценки скалярного сейсмического момента M_0 и магнитуды Канамори M_w позволили получить следующие корреляционные связи с K_p (рис. 4):

$$\lg M_0, \text{ дн}\cdot\text{см} = 0.86(\pm 0.06)\cdot K_p + 13.30(\pm 0.87), r=0.98$$

$$M_w = 0.53(\pm 0.04)\cdot K_p - 1.35(\pm 0.51), r=0.98$$

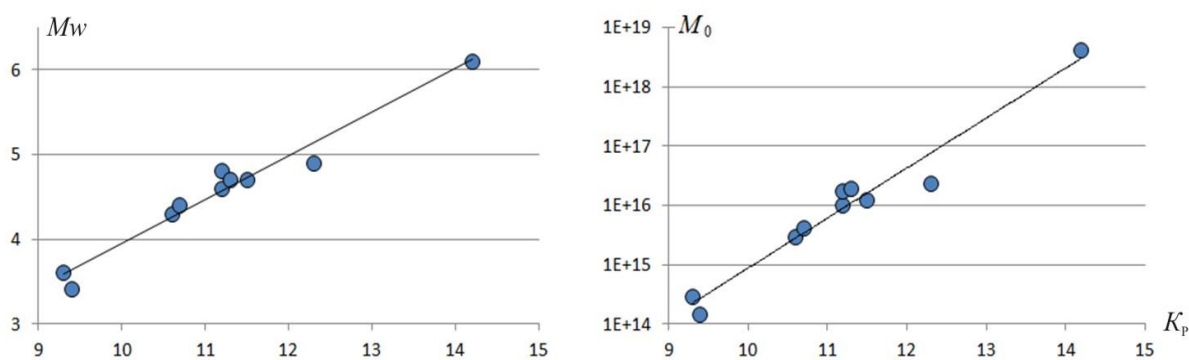


Рис. 4. Корреляция магнитуды Канамори M_w и скалярного сейсмического момента M_0 с энергетическим классом K_p

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. 331–335.
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., Малянова Л.С. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии, 2007 год. – Обнинск: ГС РАН, 2013. – С. 301–305.
6. Габсатарова И.П., Малянова Л.С. Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 297–303.
7. Габсатарова И.П., Головкова Л.В., Асманов О.А., Девяткина Л.В. (отв. сост.), Абдуллаева А.Р., Александрова Л.И., Амиров С.Р., Гамидова А.М., Иванова Л.Е., Калоева И.Ю., Киселёва О.А., Лещук Н.М., Малянова Л.С., Морозова Я.Н., Мусалаева З.А., Петросян Э.Н., Сагателова Е.Ю., Селиванова Е.А., Цирихова Г.В. (сост.). Каталог землетрясений и взрывов Северного Кавказа за 2009 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
8. Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2009 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2009–2010. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2009.
9. International Seismological Centre. On-Line Bulletin // International Seismological Centre [сайт]. [2012]. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/2009/>.
10. Габсатарова И.П. Онийское-II землетрясение 7 сентября 2009 г. с $K_p=14.2$, $M_s=5.8$ (Грузия). (См. раздел III (Сильные и ощутимые землетрясения) в наст. сб.).
11. 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.
12. 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.
13. Anderson D.L., Hart R.S. Q of the Earth // J. Geophys. Res. – 1978. – **83**. – N B12. – P. 5869–5882.
14. 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.
15. 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.
16. 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. – Обнинск: ГС РАН, 2010. – С. 138–142.
17. Brune I.V. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – **75**. – N 26. – P. 4997–5009.
18. Hanks T.S., Kanamori H. A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**. – N 135. – P. 2348–2350.