

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ и ОЧАГОВЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
СЕВЕРНОГО КАВКАЗА**

Л.С. Малянова, И.П. Габсатарова

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

Для пятнадцати землетрясений Северного Кавказа (табл. 1) построены спектры по записям станций «Кисловодск», «Сочи» и «Анапа» с использованием методики [1], примененной ранее [2–6] в этом же регионе. Из них восемь были афтершоками Онийского-II землетрясения 07.09.2009 г. [7] с $MS=5.8$ [8], $M_w=6.0$ [9] (всего их отмечено в [10] 352); четыре – ощутимые в городах Туапсе и Сочи роевые толчки сентябрьского Туапсинского роя с $M=3.0–3.3$; два – в Ставропольском крае (одно из них ощущалось в Невинномысске и Ставрополе) и по одному землетрясению – в Ростовской области и в Краснодарском крае (ощущалось в Сочи). Положение эпицентров землетрясений приводится на рис. 1.

Таблица 1. Список землетрясений Северного Кавказа, для которых рассчитаны спектры в 2010 г.

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	Эпицентр		h , км	K_p	$MPVA$	M^p	Район
			φ° , N	λ° , E					
1	19.01	17 02 29.6	47.09	42.17	5	9.2		2.9	Ростовская область
2	20.01	18 52 22.4	42.52	43.49	7	9.4	4.0	3.0	Грузия
3	12.02	11 11 52.1	42.46	43.40	6	9.6	4.0	3.1	Грузия
4	19.02	04 36 27.3	42.52	43.40	7	8.9	3.7	2.7	Грузия
5	19.02	12 45 13.5	42.51	43.40	9	9.3	3.9	2.9	Грузия
6	20.02	00 40 54.4	42.54	43.35	5	9.0	3.7	2.8	Ставропольский край
7	03.03	06 02 13.9	42.49	43.50	13	9.1	4.0	2.8	Грузия
8	12.04	02 43 28.0	42.59	43.56	6	10.8	4.9	3.8	Грузия
9	09.07	18 39 41.8	44.83	41.82	12	9.9	4.4	3.3	Ставропольский край
10	02.09	08 36 32.1	43.98	38.89	10	9.7	4.1	3.2	Черное море
11	03.09	09 37 16.3	42.57	43.38	4	9.6	4.3	3.1	Грузия
12	08.09	04 39 14.6	44.02	38.95	10	9.8	4.3	3.2	Черное море
13	12.09	20 02 08.1	44.01	38.97	9	9.9	4.4	3.3	Черное море
14	14.09	06 00 24.1	43.95	38.94	20	9.4	4.1	3.0	Черное море
15	05.10	14 34 47.7	43.72	39.89	10	10.4	4.6	3.6	Краснодарский край

Примечание. $MPVA$ – магнитуда по продольной волне P с использованием калибровочной функции Кавказа [11], M – расчетная магнитуда по формуле $K=4+1.8 K_p$ Т.Г. Раутиан [12].

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 [13–15]. Значение сейсмического момента в очаге землетрясения M_0 получено по формуле из [14]:

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

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.

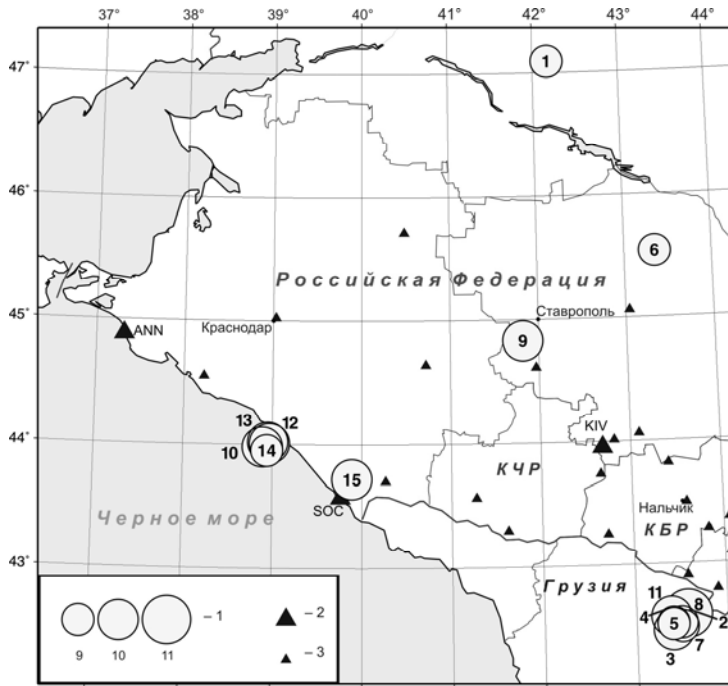


Рис. 1. Карта эпицентров землетрясений 2010 г. на Северном Кавказе, для которых проведен спектральный анализ

1 – энергетический класс K_p ; 2 – сейсмическая станция опорной сети с широкополосным сейсмографом STS-2; 3 – региональная станция с короткопериодным сейсмографом.

Для относительно слабых по магнитуде землетрясений при неизвестном механизме очага обычно принимается среднее значение $R_{0\phi}=0.6$ [16], 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 $1/r$ [17], где r – гипоцентральное расстояние. Частотная характеристика земной коры под станцией принимается в среднем равной $C(\omega)=2$ в случае отсутствия данных конкретных исследований.

В стационарные спектры были введены поправки $S(f)$ за неупругое затухание волны в мантии, которая рассчитывается по формуле (2) из [15]:

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

где t_S^* – отношение времени t_S пробега S -волны до станции регистрации к средней добротности среды Q_{cp} вдоль луча по [15] равно

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

Значение Q_{cp} для S -волн Северо-Западного Кавказа по записям станций «Анапа» «Сочи» и «Кисловодск» определено О.В. Павленко [18] и находится для полосы частот $\Delta f = 1-8$ Гц из зависимости $Q(f) \sim 90 f^{0.9}$ – для «Анапы», $Q(f) \sim 55 f^{0.9}$ – для «Сочи» и $Q(f) \sim 85 f^{0.9}$ – для «Кисловодска».

Для построения спектров выбирался фрагмент записи S -волны от начала вступления до момента, когда амплитуда этой группы волн достигла приблизительно $1/3 A_{S \max}$ [17] (пример на рис. 2). В зависимости от удаленности станции от очага землетрясения длительность τ записи выбранных фрагментов варьировалась от 60 до 90 с от вступления S -волны.

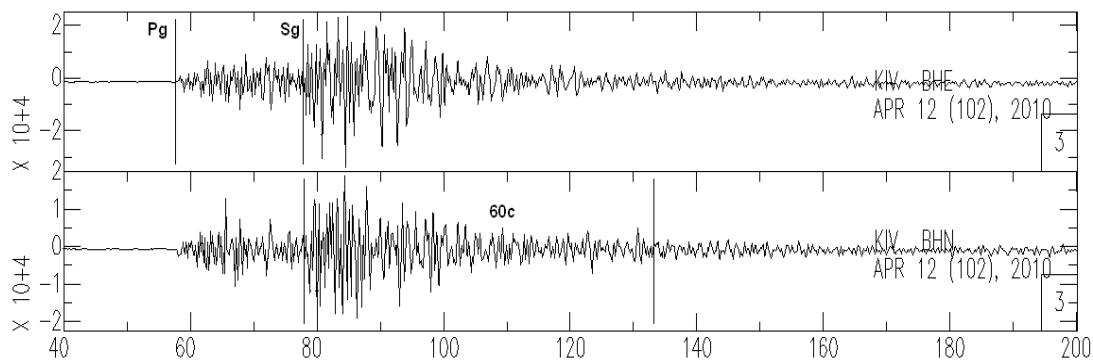


Рис. 2. Записи землетрясения 12 апреля 2010 г. в 02^h43^m с $K_p=10.8$, на горизонтальных компонентах широкополосного сейсмометра STS-1, станция «Кисловодск» ($\Delta=170$ км)

Сглаженные стационарные спектры S -волн станции «KIV» всех пятнадцати землетрясений для двух горизонтальных компонент приводятся на рис. 3. Для всех этих землетрясений корректно проведены две асимптоты в соответствии с моделью Брюна [19].

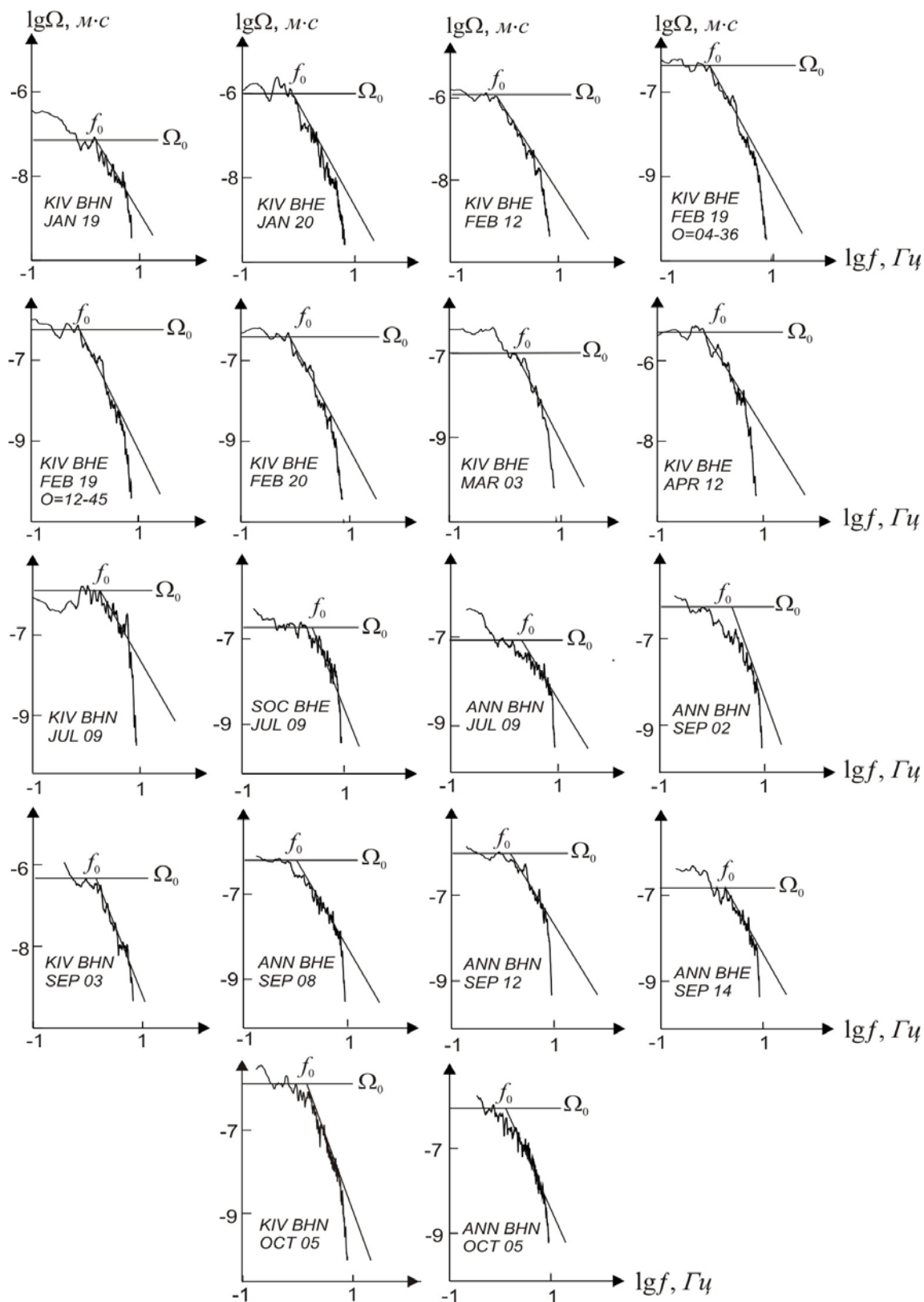


Рис. 3. Стационарные спектры на горизонтальных составляющих (BHN, BHE) станций «Кисловодск», «Сочи» и «Анапа» для землетрясений из табл. 2 (помещены спектры землетрясений, для которых проведены две асимптоты в соответствии с моделью Брюна)

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 [20]:

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

В качестве окончательного значения M_w выбрано максимальное из них.

Таблица 2. Значения спектральной амплитуды Ω_0 , скалярного сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды для 15 землетрясений Северного Кавказа в 2010 г. по данным станций «Кисловодск» (KIV), «Сочи» (SOC), «Анапа» (ANN)

№	Дата, время	t_0 , ч мин с	с/ст	Δ°	Компонента	Ω_0 , м·с	M_0 н·м	M_w
1	19.01	17 02 29.6	KIV	3.16	BHE	0.00000138	$3.7 \cdot 10^{14}$	3.7
					BHN	0.00000249	$6.7 \cdot 10^{14}$	3.8
2	20.01	18 52 22.4	KIV	1.55	BHE	0.00000580	$7.6 \cdot 10^{14}$	3.9
					BHN	0.00000412	$5.4 \cdot 10^{14}$	3.8
3	12.02	11 11 52.1	KIV	1.58	BHE	0.00000694	$9.3 \cdot 10^{14}$	3.9
					BHN	0.00000423	$5.6 \cdot 10^{14}$	3.8
4	19.02	04 36 27.3	KIV	1.52	BHE	0.00000134	$1.7 \cdot 10^{14}$	3.4
					BHN	0.000000923	$1.2 \cdot 10^{14}$	3.4
5	19.02	12 45 13.5	KIV	1.54	BHE	0.00000395	$5.2 \cdot 10^{14}$	3.8
					BHN	0.00000156	$2.0 \cdot 10^{14}$	3.5
6	20.02	00 40 54.4	KIV	1.50	BHE	0.00000226	$2.8 \cdot 10^{14}$	3.6
					BHN	0.00000109	$1.4 \cdot 10^{14}$	3.4
7	03.03	06 02 13.9	KIV	1.58	BHE	0.00000718	$9.6 \cdot 10^{13}$	3.3
					BHN	0.00000643	$8.6 \cdot 10^{13}$	3.3
8	12.04	02 43 28.0	KIV	1.51	BHE	0.0000298	$3.8 \cdot 10^{15}$	4.4
					BHN	0.0000155	$2.0 \cdot 10^{15}$	4.2
9	09.07	18 39 41.8	KIV	1.07	BHE	0.00000336	$3.0 \cdot 10^{14}$	3.6
					BHN	0.00000522	$4.7 \cdot 10^{14}$	3.7
			ANN	1.94	BHE	0.00000231	$6.0 \cdot 10^{14}$	3.8
					BHN	0.00000212	$5.5 \cdot 10^{14}$	3.8
			SOC	3.20	BHE	0.000000907	$3.8 \cdot 10^{14}$	3.7
					BHN	0.00000108	$4.5 \cdot 10^{14}$	3.7
10	02.09	08 36 32.1	ANN	1.44	BHE	0.00000143	$2.8 \cdot 10^{14}$	3.6
					BHN	0.00000148	$2.8 \cdot 10^{14}$	3.6
11	03.09	09 37 16.3	KIV	1.47	BHE	0.00000272	$3.4 \cdot 10^{14}$	3.7
					BHN	0.00000272	$3.4 \cdot 10^{14}$	3.7
12	08.09	04 39 14.6	ANN	1.45	BHE	0.00000170	$3.3 \cdot 10^{14}$	3.6
					BHN	0.00000121	$2.3 \cdot 10^{14}$	3.5
13	12.09	20 02 08.1	ANN	1.47	BHE	0.00000304	$6.0 \cdot 10^{14}$	3.8
					BHN	0.00000304	$6.0 \cdot 10^{14}$	3.8
14	14.09	06 00 24.1	ANN	1.49	BHE	0.000000549	$1.1 \cdot 10^{14}$	3.3
					BHN	0.000000491	$9.9 \cdot 10^{13}$	3.3
15	05.10	14 34 47.7	KIV	2.04	BHE	0.00000708	$1.2 \cdot 10^{15}$	4.0
					BHN	0.0000120	$2.1 \cdot 10^{15}$	4.2
			ANN	2.18	BHE	0.00000285	$8.4 \cdot 10^{14}$	3.9
					BHN	0.00000338	$9.9 \cdot 10^{14}$	4.0

Для всех пятнадцати землетрясений (табл. 2) определены характеристики f_0 и Ω_0 амплитудных спектров в соответствии с моделью Брюна [19], 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_n – частота перегиба спектра; f_0 – угловая частота; M_0 – сейсмический момент; M_w – моментная магнитуда; 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 2010 г. (S-волны)

№	Дата, д м	t_0 , ч мин с	С/ст	Компо- нента	Δ°	$\Omega_0, 10^{-6}$ м·с	f_p , Гц	f_0 , Гц	$M_0, H\cdot m$	M_w	$L, 10^3$ м	$\Delta\sigma, 10^5$ Н/м ²	$\bar{\eta}\sigma, 10^5$ Н/м ²	\bar{u} , м
1	19.01	17 02 29.6	KIV	BHN	3.16	2.49	1.8	1.8	$6.7\cdot 10^{14}$	3.8	1.2	13.6	0.7	0.020
2	20.01	18 52 22.4	KIV	BHE	1.55	5.80	0.8	0.8	$7.6\cdot 10^{14}$	3.9	2.8	1.2	1.9	0.004
3	12.02	11 11 52.1	KIV	BHE	1.58	6.94	0.7	0.7	$9.3\cdot 10^{14}$	3.9	3.2	1.0	1.3	0.004
4	19.02	04 36 27.3	KIV	BHE	1.52	1.34	0.8	0.8	$1.7\cdot 10^{14}$	3.4	2.8	0.3	1.4	0.001
5	19.02	12 45 13.5	KIV	BHE	1.54	3.95	0.8	0.8	$5.2\cdot 10^{14}$	3.8	2.8	0.8	1.2	0.003
6	20.02	00 40 54.4	KIV	BHE	1.50	2.26	0.75	0.75	$2.8\cdot 10^{14}$	3.6	3.0	0.4	1.1	0.001
7	03.03	06 02 13.9	KIV	BHE	1.58	7.18	2.0	2.0	$9.6\cdot 10^{13}$	3.3	1.1	2.5	3.9	0.003
8	12.04	02 43 28.0	KIV	BHE	1.51	29.8	0.8	0.8	$3.8\cdot 10^{15}$	4.4	2.8	6.0	5.0	0.020
9	09.07	18 39 41.8	KIV	BHN	1.07	5.22	2.0	2.0	$4.7\cdot 10^{14}$	3.7	1.1	12.4	5.1	0.016
			SOC	BHE	1.94	2.31	2.0	2.0	$6.0\cdot 10^{14}$	3.8	1.3	9.6	4.0	0.015
			ANN	BHN	3.20	1.08	1.9	2.5	$4.5\cdot 10^{14}$	3.7	1.0	15.8	5.3	0.019
		по M_0							$5.1\cdot 10^{14}$	3.8	1.1	13.4	4.6	0.018
		среднее							$5.1\cdot 10^{14}$	3.7	1.1	12.6	4.8	0.017
10	02.09	08 36 32.1	ANN	BHN	1.44	1.48	1.0	2.3	$2.8\cdot 10^{14}$	3.6	1.1	7.4	5.4	0.010
11	03.09	09 37 16.3	KIV	BHN	1.47	2.72	1.0	1.7	$3.4\cdot 10^{14}$	3.7	1.3	5.4	3.5	0.008
12	08.09	04 39 14.6	ANN	BHE	1.45	1.70	0.8	1.2	$2.3\cdot 10^{14}$	3.5	2.2	0.8	8.2	0.002
13	12.09	20 02 08.1	ANN	BHN	1.47	3.04	1.0	1.9	$6.0\cdot 10^{14}$	3.8	1.4	7.6	4.0	0.013
14	14.09	06 00 24.1	ANN	BHE	1.49	0.55	0.5	2.0	$1.1\cdot 10^{14}$	3.3	1.3	1.8	6.8	0.003
15	05.10	14 34 47.7	KIV	BHN	2.04	12.0	1.0	1.5	$2.1\cdot 10^{15}$	4.2	1.5	21.7	3.6	0.040
			ANN	BHN	2.18	3.38	0.8	1.4	$9.9\cdot 10^{14}$	4.0	1.6	8.4	7.6	0.016
		по M_0							$1.5\cdot 10^{15}$	4.1	1.6	12.8	5.0	0.025
		среднее							$1.5\cdot 10^{15}$	4.1	1.6	15.0	5.6	0.028

Оценки скалярного сейсмического момента M_0 (для сравнения с аналогичным графиком из [16] переведены в динах, умноженных на сантиметр) и магнитуды Канамори M_w позволили получить следующие корреляционные связи с K_p (формулы 5, 6 и рис. 4) для района Большого Кавказа в пределах Рачинской очаговой зоны совместно за 2009–2010 гг., рассчитанные методом наименьших квадратов:

$$\lg M_0 = 14.04(\pm 0.51) + 0.80(\pm 0.05) K_p, \quad R = 0.98, \quad (5)$$

$$M_w = -0.92(\pm 0.27) + 0.49(\pm 0.02) \cdot K_p, \quad R = 0.98. \quad (6)$$

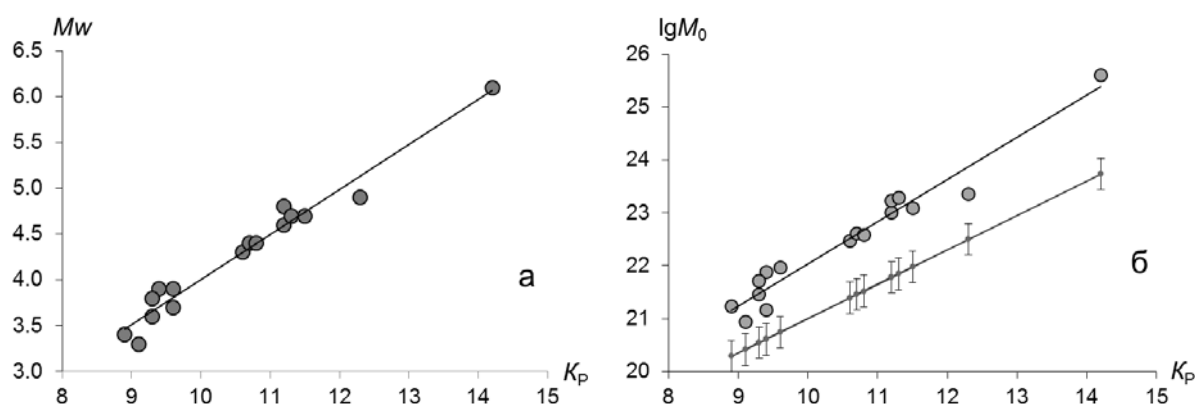


Рис. 4. Корреляционные поля зависимости от энергетического класса K_p магнитуды Канамори M_w (а) и логарифма скалярного сейсмического момента M_0 (б)

На правом фрагменте добавлена зависимость из [16].

Полученное корреляционное соотношение $M_0=f(K_p)$ (формула 5) отличается от кавказской зависимости, установленной Ю.В. Ризниченко, Э.А. Джигладзе и И.Н. Болквдзе [16] (формула 7):

$$\lg M_0 \pm 0.3 = 14.5 + 0.65 \cdot K_p \quad (7)$$

в основном для Джавахетского нагорья, и дает значения M_0 для одного и того же класса примерно на порядок выше, чем в [16].

Обратная зависимость K_p с M_w и M_0 для Рачинской зоны Большого Кавказа имеет вид (рис. 5):

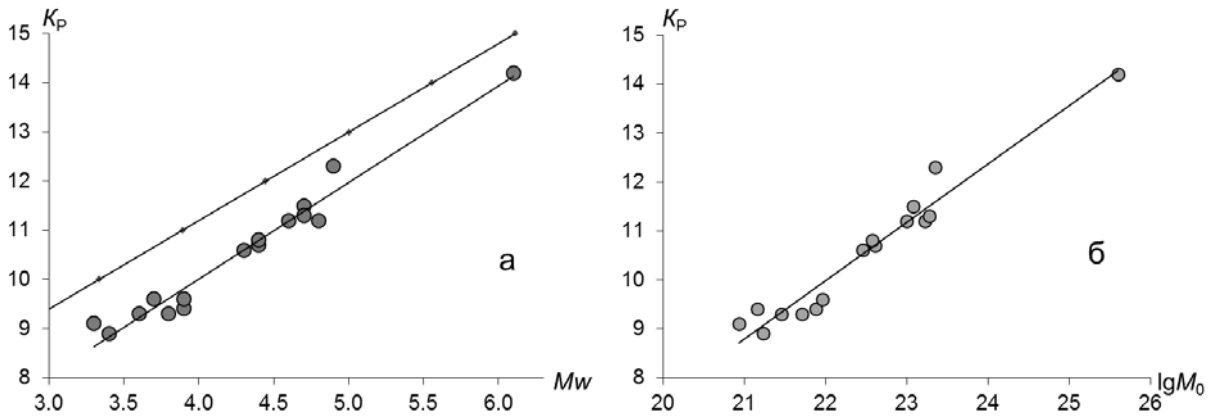


Рис. 5. Корреляция энергетического класса K_p с магнитудой Канамори M_w (а) и логарифмом скалярного сейсмического момента M_0 (б)

На левом фрагменте показана линия связи $K_p=4+1.8 M$, предложенная Т.Г. Раутиан [12].

В аналитическом виде зависимости на рис. 5 описываются следующими формулами:

$$K_p=2.17(\pm 0.43)+1.96(\pm 0.10)M_w, \quad R=0.98, \quad (8)$$

$$K_p=-16.22(\pm 1.61)+1.19(\pm 0.07)\lg M_0, \quad R=0.98. \quad (9)$$

Исходя из формулы (8), следует заключить, что в рассматриваемом диапазоне энергетических классов $\Delta K_p = 8.9-14.2$ моментная магнитуда M_w отличается от расчетных по формуле Т.Г. Раутиан магнитуд $MS(MLH)$ по поверхностным волнам, а именно: M_w превышает $MS(MLH)$ примерно на 0.5–0.7 единицы магнитуды (см. иллюстрацию на рис. 5 слева). Еще большие различия $MS(MLH)$ с M_w , особенно для классов $K_p=9-11$, будут получены по зависимости

$$K_p=6.18(\pm 0.46)+1.36(\pm 0.12)MS, \quad R=0.98, \quad (10)$$

$$K_p=5.90(\pm 0.31)+1.44(\pm 0.08)Ms, \quad R=0.66. \quad (11)$$

установленной для Кавказа в [21] по материалам сборников «Землетрясения Северной Евразии» за 1992–2007 гг., где MS и Ms – магнитуды по вертикальной компоненте поверхностных волн из международных бюллетеней [8] и [9] соответственно. Однако окончательные выводы можно будет сделать при расширении выборки землетрясений.

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 $M_w=4.6$, $MS=4.6$, $I_0^p=5-6$ (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, 2008 год. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 297–303.
6. **Малянова Л.С., Габсатарова И.П.** Спектральные и очаговые параметры землетрясений Северного Кавказа // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 271–276.
7. **Габсатарова И.П., Головкова Л.В., Селиванова Е.А.** Онийское-II землетрясение 7 сентября 2009 г. с $M_S=5.8$, $I_0^P=6-7$ (Грузия) // Землетрясения Северной Евразии, 2009 год. – Обнинск: ГС РАН, 2015. – С. 324–332.
8. **Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 2010 год** / Отв. ред. О.Е. Старовойт. – Обнинск: ГС РАН, 2010–2011. – URL: ftp://ftp.gsras.ru/pub/Teleseismic_bulletin/2010.
9. **International Seismological Centre**, On-line Bulletin, Internatl. Seis. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2013. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/bulletin/>.
10. **Габсатарова И.П., Головкова Л.В., Асманов О.А. (отв. сост.), Абдуллаева А.Р., Александрова Л.И., Амиров С.Р., Артёмова Е.В., Гамидова А.М., Девяткина Л.В., 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 в государственных границах +30 км за 2010 г. (См. Приложение к наст. сб. на CD).
11. **Соловьёва О.Н., Агаларова Э.Б., Алимamedова В.П., Гасанов А.Г., Геодагян Э.Г., Гюль Э.К., Дарахвелидзе Л.К., Петросян М.Д., Фабрициус З.Э., Хромецкая Е.А.** Калибровочные функции для определения магнитуды Кавказских землетрясений по короткопериодной волне P на малых эпицентральных расстояниях // Интерпретация сейсмических наблюдений. – М.: МГК при Президиуме АН СССР, 1983. – С. 65–72
12. **Раутиан Т.Г.** Энергия землетрясений // Методы детального изучения сейсмичности. (Труды ИФЗ АН СССР; № 9(176)). – М.: ИФЗ АН СССР, 1960. – С. 75–114.
13. **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.
14. **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.
15. **Anderson D.L., Hart R.S.** Q of the Earth // J. Geophys. Res. – 1978. – **83**. – N B12. – P. 5869–5882.
16. **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.
17. **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.
18. **Павленко В.А., Павленко О.В.** Поглощение сейсмических волн в коре и верхней мантии в окрестностях сейсмостанции «Кисловодск» // Физика Земли. – 2016. – № 4. – С. 24–34.
19. **Brune I.V.** Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. – 1970. – **75**. – N 26. – P. 4997–5009.
20. **Hanks T.S., Kanamori H.** A moment magnitude scale // J. Geophys. Res. – 1979. – **84**. – N 135. – P. 2348–2350.
21. **Петрова Н.В., Михайлова Р.С.** Соотношения энергетического класса K_p с магнитудами по поверхностным волнам MS , M_s MLH землетрясений в регионах Северной Евразии // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой Международной сейсмологической школы. Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ГС РАН, 2014. – С. 365–369.