

УДК 550.34.1

Мамыров Э.

*Институт сейсмологии НАН КР,  
г. Бишкек, Кыргызстан.*

## ОБОСНОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ МАГНИТУДЫ ПО ОБЪЕМНЫМ ВОЛНАМ С СЕЙСМИЧЕСКИМ МОМЕНТОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

**Аннотация:** В статье дано обоснование взаимосвязи магнитуды по объемным волнам с сейсмическим моментом землетрясений.

**Ключевые слова:** магнитуда, сейсмический момент, энергетический класс, землетрясение, объемная волна.

## ЖЕР ТИТИРӨӨЛӨРДҮН СЕЙСМИКАЛЫК УЧУРУ МЕНЕН КӨЛӨМДҮҮ ТОЛКУНДАРЫ БОЮНЧА МАГНИТУДАНЫН ӨЗ АРА БАЙЛАНЫШЫН НЕГИЗДӨӨ

**Кыскача мазмуну:** Макалада жер титирөөнүн көлөмдүү толкундарынын магнитудасы менен сейсмикалык учурдун өз ара байланышынын негизделиши берилген.

**Негизги сөздөр:** магнитуда, сейсмикалык учур, энергетикалык класс, жер титирөө, көлөмдүү толкун.

## EXPLANATION OF THE CORRELATION OF A BODY-WAVE MAGNITUDE WITH EARTHQUAKE'S SEISMIC MOMENT

**Abstract:** In the paper the explanation of the correlation of a body-wave magnitude with earthquake's seismic moment is given.

**Keywords:** magnitude, seismic moment, energy class, earthquake, body wave.

**Введение.** Магнитуда  $m_b$  по объемным волнам является важной шкалой оценки масштабов коровых землетрясений и основана на амплитуде телесейсмических объемных волн. Она определяется формулой [1]:

$$m_b = \lg (A/T) + Q, \quad (1)$$

где  $Q$  - функция эпицентрального расстояния и глубины очага, эмпирически определенная Гутенбергом и Рихтером для исключения влияния пути на наблюдаемую амплитуду;  $A/T$  - максимум в одной из волновых групп  $P$ ,  $PP$  или  $SH$ ;  $A$  - амплитуда,  $T$  - период.

Практическое определение  $m_b$ , осуществляемое Геологической службой США для текущих бюллетеней, значительно отличается от методики, предложенной Гутенбергом и Рихтером [1], которые анализировали записи широкополосных приборов, регистрирующих при сильных землетрясениях относительно длиннопериодные  $P$  - волны ( $T= 4-10$  сек). Измерения Геологической службы США, обычно, основаны на записях короткопериодных приборов WWSSN, где  $P$ -волны практически всегда имеют период около 1 сек [1].

Сейсмологическими службами стран бывшего СССР используется магнитуда  $m_{pv}$  по прибору СКМ с пиковой характеристикой  $P$ -волн, максимум которой лежит при периодах 0.5-1.5 сек. В США используются приборы Бенъофа с пиковой характеристикой при перио-

дах 0.7-0.8 сек [2-4]. По [3] из-за конструкционных особенностей вышеуказанных приборов шкалы  $m_{pv}$  и  $m_b$  неидентичны даже для слабых землетрясений.

Для крупных землетрясений с моментной магнитудой  $M_w > 6.0$  различие между  $m_{pv}$  и  $m_b$  становится более существенным из-за дополнительного условия, используемые NEIC при измерении амплитуд: брать максимум среди первых нескольких циклов, из-за чего  $m_b$  теряет смысл и быстро насыщается, примерно, на уровне  $m_b = 6.4$ . В связи с этим были введены новые «исправленные» или пиковые магнитуды  $m_b^*$  и  $\hat{m}_b$  для крупных землетрясений, для которых были использованы истинные максимальные амплитуды колебаний ( $T = 1-10$  сек), взятых с сейсмограмм [3].

Вместе с тем, до сих пор не существует единой самосогласованной системы функциональных зависимостей различных модификаций магнитуды по объемным волнам с другими магнитудами и сейсмическим моментом  $M_0$ , как опорной шкалы. Во всех обзорах по данной проблеме количественные соотношения между магнитудами и  $M_0$  являются эмпирическими и могут быть использованы только для определенных интервалов  $M_0$  [3, 5-6]. В связи с вышеизложенным, основной целью данной работы является обоснование функциональной связи  $m_b$  с максимальной амплитудой сейсмических колебаний и с  $M_0$ , установление управляющих параметров межмагнитудных соотношений и взаимосвязи энергии сейсмического излучения с магнитудой  $m_b$  ( $m_{pv}$ ).

### Основные эмпирические соотношения.

По [4-8] наиболее важным среднестатистическим соотношением между  $m_b$  и телесеismicкой магнитудой по поверхностным волнам  $M_s$  является линейная зависимость Гутенберга - Рихтера [7]:

$$m_b = 0.63 M_s + 2.5. \quad (2)$$

Из многочисленных публикаций по данной проблеме, обзор которых выполнен в работах [2-6], мы сочли возможным привести первые критические обобщения Поликарповой [8], которые указывают, что **выражение (2) не является универсальным**.

Как подчеркнуто в этой работе, отсутствие в литературе исходных данных, по которым рассчитано выражение (2), не дает возможности использовать эту формулу в тех случаях, когда необходимо оценить точность различных расчетов или прогнозировать значение  $M_s$  по известным величинам  $m_b$ .

Магнитуды  $M_s$  из (2) можно было бы определить лишь в том случае, если бы коэффициент корреляции  $r$  между  $m_b$  и  $M_s$  был равен или близок к единице. При  $r \neq 1$  коэффициенты линейного соотношения  $M_s = a m_b + b$  будут отличаться от тех, которые получаются при пересчете уравнения (2). Так, например,  $a \neq r/0.63$ , а должно определяться по формуле  $a = r^2/0.63$  [8]:

При эпицентральных расстояниях 2000-11000 км для магнитуды  $m_{bp}$  по Р-волнам было получено [8]:

$$m_{bp} = 0.57 (\pm 0.09) M_s + 3.07 (\pm 0.06), \quad r = 0.63, \quad N = 196, \quad (3)$$

для магнитуды  $m_{bs}$  по S – волнам:

$$m_{bs} = 0.82 (\pm 0.10) M_s + 1.99 (\pm 0.06), \quad r = 0.66, \quad N = 183, \quad (4)$$

где  $N$  - число событий.

Между магнитудами объемных волн  $m_{bp}$  и  $m_{bs}$  установлены следующие корреляционные зависимости [8]:

$$m_{bp} = 0.69 (\pm 0.09) m_{bs} + 1.24 (\pm 0.06), \quad r = 0.71, \quad N=157, \quad (5)$$

$$m_{bs} = 0.76 (\pm 0.08) m_{bp} + 1.23 (\pm 0.05), \quad r = 0.71, \quad N=157. \quad (6)$$

По Поликарповой [8] для выражений (3) - (6) среднеквадратичное отклонение  $\sigma_p$  составляет 0.44 - 0.53 в интервале  $4.2 \leq m_{bp} < 7.7$  и  $3.5 \leq M_s \leq 7.5$ . Из этих соотношений следует, что они будут, примерно, соответствовать формуле (2), если считать, что  $m_b$  в (2) является среднеарифметическим значением  $m_{bp}$  и  $m_{bs}$ , а в рассматриваемых интервалах магнитуд зна-

чения  $m_{br}$  из (3) будут превышать  $m_b$  по (2) примерно на 0.25 единицы магнитуды. Кроме этого, из (5) - (6) следует, что для указанных эпицентральных расстояний можно принять, что  $m_b \approx m_{br} \approx m_{bs}$  с учетом точности определения магнитуд по объемным волнам.

В связи с «насыщением» магнитуды  $m_b$  для крупных землетрясений при  $M_S > 7$  в работе [9] эмпирически была введена новая уточненная пиковая магнитуда  $\hat{m}_b$  объемных Р-волн, которая может быть рассчитана из следующей корреляционной формулы:

$$\hat{m}_b = 2.70 + 0.53 M_W \quad (7)$$

Для расчетов  $\hat{m}_b$  были использованы истинные максимальные амплитуды  $A_g$  колебаний Р-волн, взятые с сейсмограмм.

Поскольку значение  $M_W$  ( $M_0$ , в Н · м) определяется из формулы [10]:

$$M_W = 2/3 \lg M_0 - 6.07, \quad (8)$$

то из (7) - (8) следует, что величина  $A_g$  пропорциональна  $M_0$  [9] или  $A_g \sim f(M_0^{0.35})$ .

Гусевым и др. [3] было показано, что зависимость магнитуды  $m_{pv}$  (прибор СКМ) от  $M_W$  хорошо аппроксимируется следующей линейной ( $6.6 \leq M_W \leq 9.5$ ) зависимостью:

$$m_{pv} = 2.86 + 0.525 M_W = 0.35 \lg M_0 - 2.75. \quad (9)$$

По Раутиан и др. [11] для землетрясений Центральной Азии соотношение между магнитудой  $m_b$  и энергетическим классом  $K_R$  выражается следующей эмпирической формулой:

$$m_b = 5.53 + 0.45 (K_R - 14) = 0.45 K_R - 0.77. \quad (10)$$

По Михайловой и др. [12] для землетрясений Тянь-Шаня статистическая связь  $K_R$  с  $m_{pv}$  выражается следующими эмпирически соотношением:

$$K_R = 0.66 + 2.13 m_{pv} \quad (11)$$

Наши обобщения последних лет [12] показали, что корреляционную зависимость  $m_{pv}$  от  $K_R$  в интервале  $2 \leq K_R \leq 17$  для землетрясений Тянь-Шаня (1902-2012гг.) можно выразить формулой ( $N=8593$ ,  $r=0.95$ ):

$$m_{pv} = 0.42 K_R - 0.08. \quad (12)$$

При дальнейшем изложении будет сделана попытка физического обоснования эмпирических формул (2), (7), (10) – (12), исходя из единой самосогласованной системы взаимосвязи магнитуд с  $M_0$  и межмагнитудных соотношений, предложенных нами в работах [12-14].

### Обоснование количественных соотношений $m_b$ с $M_0$ , $M_S$ , $K_R$ и их управляющие параметры

Ранее нами было показано, что значение модернизированной магнитуды по объемным волнам  $m_{bm} = m_b$  можно определить из следующего теоретического соотношения [12-14]:

$$m_{bm} = 6 + \lg u = 6.3 + \lg b_m = C_1 + A_0 - 2 \lg t_0, \quad (13)$$

где  $C_1 = \lg [2\pi (2.34)^{-2} \cdot \mu^{-1} \cdot v_S] + 6.3$ ,  $\mu$  - модуль сдвига, Па;  $u$  - среднее смещение по разлому, м;  $b_m$  - максимальная амплитуда сейсмических колебаний, м;  $v_S$  - скорость S-волн, м/с,  $t_0$  - corner период Брюна [15], с,  $A_0 = \lg M_0$ ;  $M_0$ , в Н·м.

Для стандартных величин плотности  $\rho$  земной коры ( $\rho = 2830$  кг/м<sup>3</sup>) и скорости  $v_S = 3600$  м/с выражение (14) трансформируется следующему виду:

$$m_{bm} = A_0 - 2 \lg t_0 - 11.30 = \frac{1}{3} A_0 + \frac{2}{3} \lg \Delta\sigma - 4.80, \quad (14)$$

где  $\Delta\sigma$  - статическое сброшенное сейсмическое напряжение, Па.

По [10] энергия сейсмического излучения  $E_{SK}$  (Дж) равна  $E_{SK} = (\Delta\sigma / 2 \mu) M_0$  или ( $K_{SK} = \lg E_{SK}$ ):

$$K_{SK} = 2 A_0 - 3 \lg t_0 - 20.61 = A_0 + \lg \Delta\sigma - 10.87. \quad (15)$$

Модернизированная телесеismicкая магнитуда  $M_{Sm}$  (эквивалент  $M_S$  и  $M_W$  при  $\Delta\sigma = \text{const}$ ) равна:

$$M_{Sm} = (4/3) A_0 - 2 \lg t_0 - 16.95 = 2/3 (A_0 + \lg \Delta\sigma) - 10.45 = 2/3 K_{Sk} - 3.2. \quad (16)$$

При стандартных  $E_{Sk}/M_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  и  $\Delta\sigma = 3.67$  МПа = const справедливо равенство  $M_{Sm} = M_w$ . Здесь же следует подчеркнуть, что в (14) и (16) при  $A_0 = \text{const}$ , чем больше  $\Delta\sigma$ , тем больше численные значения магнитуд  $m_{bm}$  и  $M_{Sm}$ .

Соотношение (2), (7)–(9) и (16) указывают на то, что между модернизированными магнитудами  $M_m$  ( $m_{bm}$ ,  $M_{Sm}$ ) и  $A_0$  могут существовать линейные функциональные зависимости вида:

$$M_m(m_{bm}, M_{Sm}) = k_i + z_i A_0, \quad (17)$$

в которой коэффициенты  $k_i$  и  $z_i$  управляются параметрами  $a_t$  и  $b_t$  в уравнении:

$$\lg t_0 = a_t + b_t A_0. \quad (18)$$

В этом уравнении при  $\Delta\sigma = \text{const}$   $b_t = 1/3 = \text{const}$ , а для других случаев величина  $b_t$  не является постоянной и отражает увеличение  $\Delta\sigma$  с ростом  $M_0$  [12], что приводит к возникновению многочисленных эмпирических формул по зависимости магнитуд от  $A_0$  и межмагнитудных соотношений [12-14].

С учетом (13)–(16) и (17)–(18) для  $m_{bm}$ ,  $K_{Sk}$  и  $M_{Sm}$  можно записать (для стандартных величин  $\rho$  и  $v_s$ ):

$$m_{bm} = (1 - 2 \cdot b_t) A_0 - 2a_t - 11.30, \quad (19)$$

$$M_{Sm} = (4/3 - 2 \cdot b_t) A_0 - 2a_t - 16.95, \quad (20)$$

$$K_{Sk} = (2 - 3 \cdot b_t) A_0 - 2a_t - 20.61. \quad (21)$$

Выражения (19)–(21) позволяют составить самосогласованную систему функциональных зависимостей  $m_{bm}$ ,  $M_{Sm}$  и  $K_{Sk}$  от  $A_0$  и  $\lg t_0$ , на основе которых можно впервые составить физически обоснованные межмагнитудные соотношения.

### Магнитуды $m_b$ и $\hat{m}_b$ : обсуждение расчетных и эмпирических соотношений

При стандартных величинах  $\rho$ ,  $v_s$ ,  $E_{Sk}/M_0 = 5 \cdot 10^{-5}$  и  $\Delta\sigma = 3.67$  МПа = const на основе (8), (14), (16) и (19) можно записать:

$$m_{bm} = 1/3 A_0 - 0.44 = 2.60 + 0.5 M_{Sm}. \quad (22)$$

Это соотношение в пределах точности определения магнитуды по объемным волнам удовлетворительно совпадает с выражениями (7) по расчету  $\hat{m}_b$  и (9) для определения  $m_{PV}$ . Поскольку значения  $\hat{m}_b$  пропорциональны  $M_0$  и  $A_g \sim f(M_0^{0.35})$  и  $m_{bm} \approx \hat{m}_b \approx m_{PV}$ , то величина  $b_m$  – максимальная амплитуда сейсмических колебаний принята в (13) как основа расчетов  $m_{bm}$ , пропорциональна  $M_0^{0.33}$  или  $b_m \sim f(M_0^{0.33})$ . Подобным образом, величина максимальной амплитуды вертикальной составляющей  $P$  – волн –  $A_{PV}$ , по которой рассчитывается значение  $m_{PV}$  по (9), пропорциональна  $M_0^{0.35}$  или  $A_{PV} \sim f(M_0^{0.35})$ . Из этих сопоставлений следует, что по физическому смыслу магнитуды  $m_{bm}$ ,  $\hat{m}_b$  и  $m_{PV}$  равноценны между собой. Следовательно, магнитуды по объемным волнам функционально взаимосвязаны с величиной среднего смещения по разлому  $u$ .

В таблице 1 приведено сопоставление магнитуды  $\hat{m}_b$  по [9, 16], определенных по истинным максимальным амплитудам колебаний  $P$  – волн  $A_g$  ряда крупных землетрясений, взятых с сейсмограмм в интервале периодов  $T = 1-10$  с, с расчетной  $m_{bm}$  по формуле (14). Из представленных данных следует, что в интервале  $6.3 < M_w < 9.6$  при  $\lg \Delta\sigma \geq 7.0$  численное значение  $m_{bm}$  равно  $\hat{m}_b$  (таблица 1). К примеру для грандиозного землетрясения в Чили (1960 г.) при  $\lg \Delta\sigma = 7.10$   $\hat{m}_b = 7.57$  и  $m_b = 7.71$ , для разрушительного землетрясения Тангшань (1976 г.) при  $\lg \Delta\sigma = 7.37$   $m_b = 6.3$   $\hat{m}_b = 6.9$  и  $m_b = 6.92$  и т.д. В интервале  $6.3 < \lg \Delta\sigma < 7.0$  значения  $m_{bm}$  на 0.30 – 0.70 меньше чем  $\hat{m}_b$  (табл.1). Вышеприведенные выводы подтверждаются данными сопоставления расчетных  $m_{bm}$  и  $\hat{m}_b$  по (7) для землетрясений Курильских островов и Японии ( $\varphi = 30 + 40^\circ$ ,  $\lambda = 140 + 150^\circ$ ) а так же о. Суматра ( $\varphi = -10 + 10^\circ$ ,  $\lambda = 90 +$

100°), за 1993-2012 гг. в интервале  $16 \leq A_0 \leq 22$ , приведенных на рисунках 1-2. Для землетрясений этих регионов за указанный период среднее значение  $\lg \Delta \sigma$  составляет 7.15 [12] и поэтому величины  $m_{bm}$  и  $\hat{m}_b$  практически равны между собой (рис.1-2).

#### Соотношения $m_{bm}$ – $K_{SK}$ и $m_{PV}$ – $K_R$ .

На основе (19) и (21) функциональную связь  $m_{bm}$  от  $K_{SK}$  можно выразить формулой:

$$m_{bm} = \frac{(1 - 2 \cdot b_t)}{(2 - 3 \cdot b_t)} (K_{SK} + 3 a_t + 20.61) - 2a_t - 11.30. \quad (23)$$

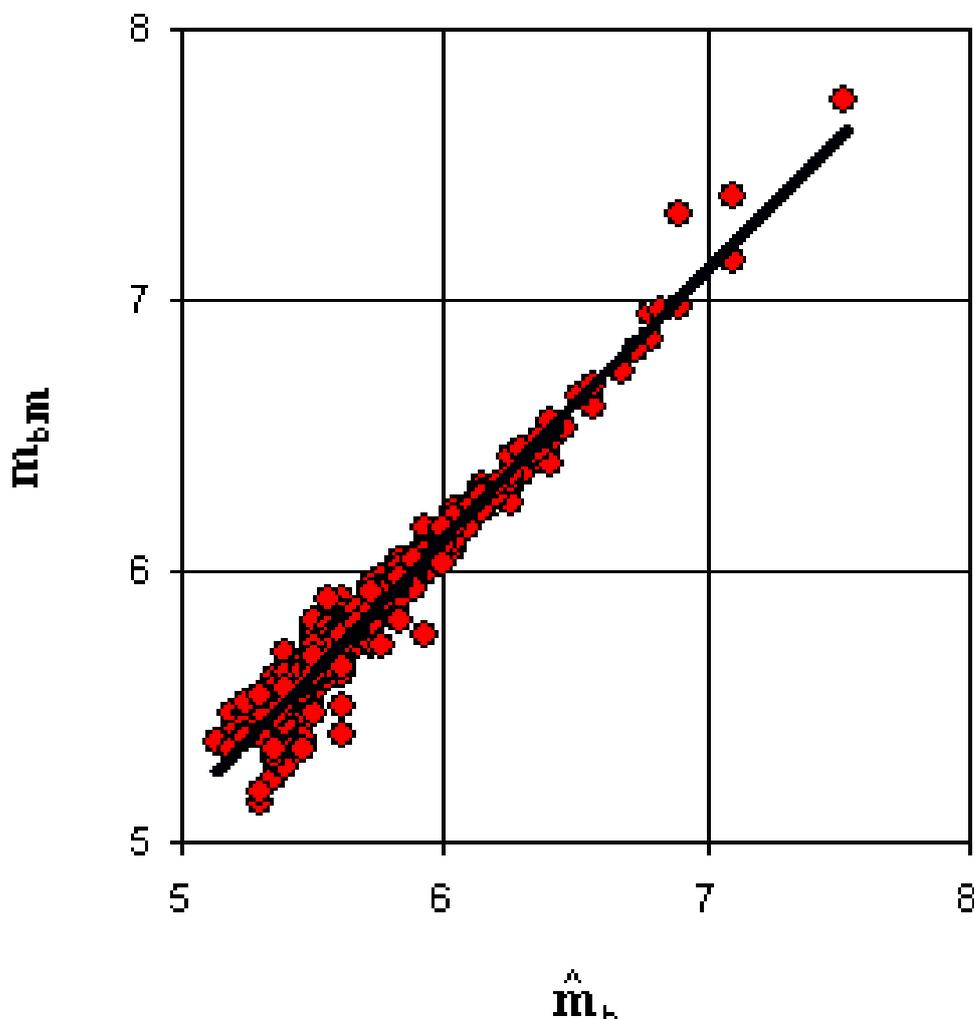
Для землетрясений Тянь-Шаня нами было получена следующая корреляционная зависимость  $\lg t_0$  от  $A_0$  [12] :

$$\lg t_0 = 0.22 A_0 - 3.45, \quad (24)$$

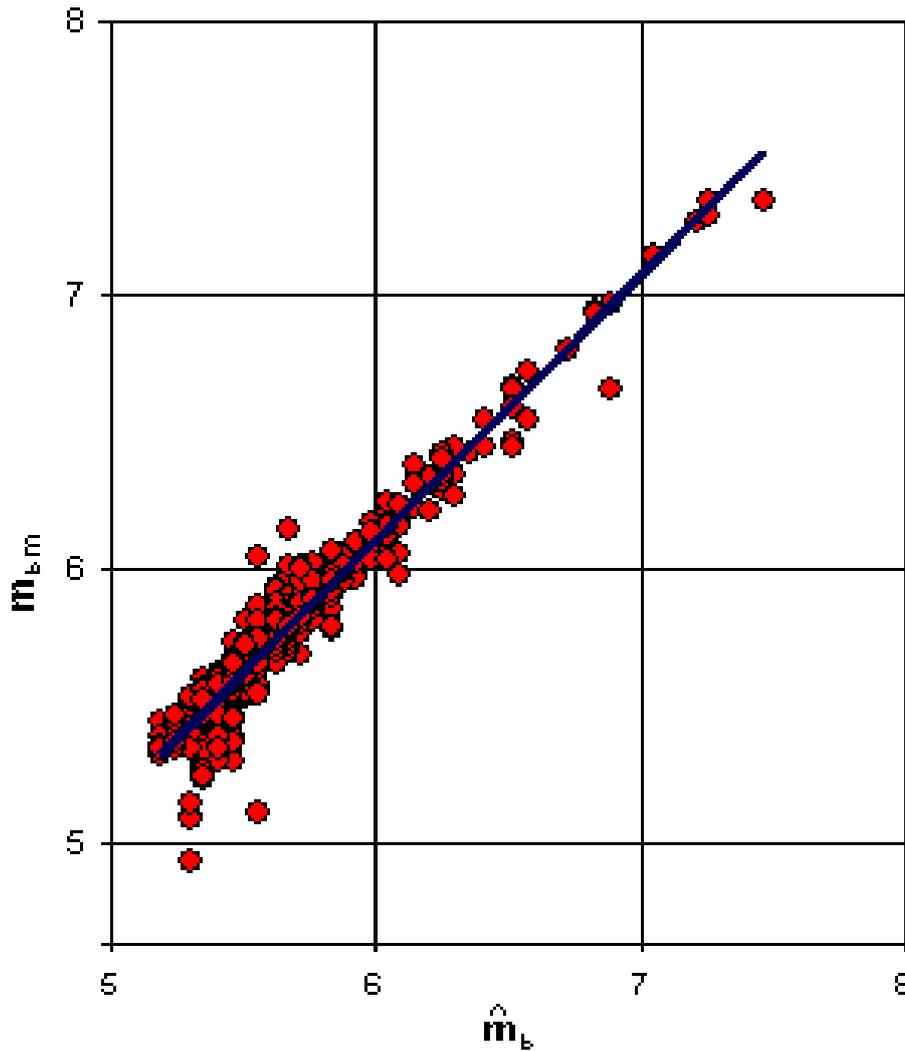
т.е. в (18)  $a_t = -3.45$  и  $b_t = 0.22$ .

Учитывая, что  $m_{PV} \approx m_b + 0.20$  и принимая  $m_b = m_{bm}$ , а так же то, что  $K_{SK} = K_R + 0.66$  [12], выражение (23) с учетом (24) можно привести к следующему виду:

$$m_{PV} = 0.42 K_R - 0.58. \quad (25)$$



**Рис. 1 .** Зависимость между магнитудами  $m_{bm}$  и  $\hat{m}_b$  для землетрясений Курильских о-в и Японии  $m_{bm} = 1.00(\pm 0.02) \hat{m}_b + 0.14(\pm 0.003)$ ,  $N = 521$ ,  $r = 0.97$ .



**Рис.2.** Зависимость  $m_{bm}$  от  $\hat{m}_{bm}$  для землетрясений о. Суматра (1993-2012 гг.)

$$m_{bm} = 0.96(\pm 0.02)\hat{m}_{bm} + 0.37(\pm 0.007), N = 637, r = 0.96.$$

Полуэмпирическое соотношение (25) находится в хорошем согласии с формулами (10) – (11), полученными эмпирически известными сейсмологами СССР.

**Таблица 1.** Сопоставление магнитуды  $\hat{m}_a$  (Houtson, Kanamori, 1986; Zhuo, Kanamori, 1987) и расчетных  $m_{em}$  для ряда крупных землетрясений земного шара

№№ п/п	Дата	Время	$\varphi$	$\lambda$	Depth h, km	$\log_{10} M_0$ , N·m	$\log_{10} t_0$ , sec	$m_e$	$\hat{m}_a$	$m_{em}$	$M_S$	$M_W$	$M_{sm}$	$\log_{10} \Delta\sigma$ , $\Delta\sigma$ , Pa	Region
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1960/5/22	19:11:17.5	-38.29	-73.05	35	23.35	2.17		7.57	7.71	8.5	9.6	9.76	7.10	Great Chilean
2	1963/10/13	5:17:55.1	44.76	149.80	26	21.85	1.88		7.23	6.79	8.1	8.5	8.35	6.47	Great Alaska
3	1964/3/28	3:36:12.7	61.02	-147.63	6	22.96	2.15		7.64	7.36	8.4	9.2	9.29	6.77	Rat Island
4	1965/2/4	5:01:21.7	51.21	178.50	29	22.15	1.94		7.19	6.97	8.2	8.7	8.63	6.59	Kurile Isl.
5	1967/7/22	16:56:55.3	40.63	30.74	4	20.20	1.32		6.38	6.26	7.1	7.4	7.28	6.50	Tyrkey
6	1968/5/16	0:49:0.4	40.90	143.35	26	21.45	1.71		7.18	6.73	8.1	8.3	8.16	6.58	Tokachi-oki
7	1969/8/11	21:27:37.6	43.48	147.82	46	21.34	1.71		6.90	6.62	7.8	8.2	8.01	6.47	Kurile Isl.
8	1971/2/9	14:00:41.0				19.08	0.85	6.2	6.41	6.08	6.7	6.6	6.73	6.79	San Fernando
9	1974/10/3	14:21:34.5	-12.25	-77.52	36	21.18	1.65		7.0	6.68	7.6	8.1	7.92	6.49	Haicheng, China
10	1975/2/4	11:36:7.1	40.67	122.65	16	19.61	1.05		6.76	6.21		7.0	7.03	6.72	Peru
11	1976/2/4	9:01:7.2	15.14	-89.78	16.3	20.31	1.14	6.2	6.66	6.73	7.5	7.5	7.78	7.15	Gua temala
12	1976/5/29	12:23:29.9	24.39	98.65	15	19.09	0.72	6.1	6.5	6.35	6.9	6.7	7.00	7.19	Longlin, China
13	1976/5/29	14:00:33.2	24.29	98.58	15	19.05	0.73	6.0	6.5	6.29	7.0	6.6	6.93	7.12	Longlin, China
14	1976/7/27	19:42:11.1	39.52	118.03	15	20.44	1.11	6.3	6.9	6.92	7.9	7.6	8.01	7.37	Tangshan, China
15	1976/7/28	10:45:45.9	39.75	118.78	15	19.55	0.88	6.3	6.7	6.49	7.4	7.0	7.29	7.47	Tangshan, China
16	1976/8/16	14:6:55.0	32.63	104.42	15	19.11	0.73	6.1	6.9	6.35	6.9	6.7	7.01	7.18	Songpan, China
17	1976/8/16	16:11:38.7	7.07	123.75	33	21.04	1.34	6.4	7.26	7.06	7.9	8.0	8.35	7.28	Mindanao
18	1976/8/21	21:49:57.8	32.37	104.29	15.3	18.50	0.52	6.1	6.7	6.16	6.4	6.3	6.61	7.20	Songpan China
19	1976/8/23	3:30:11.5	32.11	104.21	19.6	18.66	0.58	6.2	6.6	6.20	6.7	6.4	6.71	7.18	Songpan China
20	1976/11/6	18:4:16.0	27.50	101.40	22.7	18.56	0.54	5.8	6.5	6.18	6.5	6.3	6.65	7.20	Yanyuan, China
21	1976/11/15	13:53:7.2	39.45	117.71	15	18.63	0.56	6.0	6.3	6.21	6.3	6.4	6.71	7.21	Tangshan, China
22	1976/11/24	12:22:25.3	38.88	43.96	15	19.62	0.90	6.1	6.58	6.52	7.3	7.0	7.34	7.16	Sumbawa
23	1977/8/19	6:9:33.1	-11.14	118.23	23.3	21.55	1.48	7.0	7.47	7.29	7.9	8.3	8.75	7.37	Iran
24	1978/9/16	15:36:13.5	33.37	57.02	11	20.12	1.34	6.5	6.9	6.14	7.4	7.3	7.13	6.36	Oaxaca
25	1978/11/29	19:53:2.9	16.22	-96.56	16.1	20.72	1.36	6.4	6.87	6.70	7.7	7.7	7.89	6.90	Tyrkey
26	1979/3/14	11:7:31.1	17.78	-101.37	26.7	20.23	1.27	6.5	6.71	6.39	7.6	7.4	7.41	6.69	Petatlan
27	1979/10/15	23:17:0.8	32.62	-115.57	12	18.86	0.78	5.7	5.92	6.00	6.9	6.5	6.57	6.78	Imperial Yalley
28	1979/12/12	8:00:7.0	2.32	-78.81	19.7	21.23	1.35	6.4	6.91	7.23	7.7	8.1	8.58	7.44	Colymbia
29	1980/1/1	16:42:49.8	38.80	-27.74	10	19.45	1.00	6.0	6.3	6.15	6.7	6.9	6.92	6.71	Azores Isl.
30	1980/2/7	10:49:26.3	-54.29	158.43	15	19.36	1.01	6.1	6.2	6.04	6.5	6.8	6.79	6.59	Macguarie Isl.
31	1980/7/17	19:43:3.1	-12.44	165.94	34	20.68	1.24	5.8	6.79	6.90	7.9	7.8	8.07	7.22	Eureka
32	1980/10/10	12:25:25.5	36.14	1.41	12	19.70	1.00	6.5	6.5	6.40	7.3	7.1	7.32	6.36	Santa Grus Isl.
33	1980/11/8	10:27:45.9	41.14	-124.36	15	20.05	1.00	6.2	6.7	6.75	7.2	7.3	7.72	7.31	El Asnam, Algeria
34	1981/1/23	21:13:55.6	30.86	101.35	10	18.86	0.78	5.7	6.5	6.00	6.8	6.5	6.57	6.78	Daofu, China
35	1981/2/24	20:53:49.2	38.07	23.04	10	18.95	0.78	5.9	6.6	6.09	6.7	6.6	6.69	6.97	Greece
36	1981/4/24	21:50:14.3	-13.51	166.43	44.4	19.55	0.90	6.1	6.2	6.45	6.9	6.8	7.25	7.11	Yanuati Isl.
37	1981/4/27	18:17:40.0	-57.58	147.86	10	18.91	0.78	5.7	6.1	6.05	6.5	6.5	6.64	6.83	Macguarie Isl.
38	1981/7/28	17:22:43.6	30.01	57.8	15.2	19.95	1.15	5.7	6.9	6.35	7.1	7.2	7.28	6.76	Kurile Isl.
39	1991/9/3	5:35:50.1	42.97	147.87	35.7	18.88	0.70	6.6	6.5	6.18	6.6	6.5	6.76	7.04	Papua, New Guinea

**Таблица 1.** (Продолжение) Сопоставление магнитуды  $\hat{m}_a$  (Houtson, Kanamori, 1986; Zhuo, Kanamori, 1987) и расчетных  $m_{em}$  для ряда крупных землетрясений земного шара

№ № п/п	Дата	Время	$\varphi$	$\lambda$	Depth h, km	$\log_{10} M_0$ , N m	$\log_{10} t_0$ $t_0$ , sec	$m_b$	$\hat{m}_a$	$m_{em}$	$M_S$	$M_W$	$M_{Sm}$	$\log_{10} \Delta\sigma$ , Pa	$\Delta\sigma$	Region
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
40	1981/11/6	16:47:51	-3.18	143.72	15	18.96	0.84	6.2	6.2	5.98	6.9	6.6	6.59	6.70	Loayltu Isl.	
41	1981/11/24	23:30:41.9	-22.19	170.32	23.3	19.13	0.87	5.7	6.2	6.09	6.7	6.7	6.75	6.79	Kermades Isl.	
42	1981/12/24	5:33:33.3	-29.81	-177.55	19.4	19.32	1.08	6.1	6.4	5.86	6.8	6.8	6.58	6.34	Iran	
43	1982/8/5	20:33:2.0	-12.52	166.01	23.9	19.50	0.98	6.2	6.3	6.24	7.1	6.9	7.02	6.82	Santa Grus Isl.	
44	1982/12/19	17:44:21.8	-24.31	175.0	29.2	20.30	1.33	6.0	6.4	6.34	7.7	7.5	7.39	6.57	Tonga Isl.	
45	1983/4/3	2:50:26.4	8.85	-83.25	28	20.26	1.27	6.5	6.6	6.42	7.2	7.4	7.52	6.71	Panama	
46	1983/5/2	23:43:44.7	36.42	-120.66	14.5	18.60	0.79	6.2	6.0	5.72	6.5	6.3	6.25	6.49	Akito Oki, Japan	
47	1983/5/26	3:0:18.3	40.44	138.87	12.6	20.66	1.30	6.8	7.2	6.76	7.7	7.7	7.93	7.02	Coolinga	
48	1983/10/4	18:52:37.8	-26.01	-70.56	38.7	20.53	1.46	6.4	6.8	6.31	7.3	7.6	7.50	6.41	Chili	
49	1983/10/28	14:6:22.5	44.35	-113.98	13.7	19.49	1.00	6.2	6.6	6.19	7.3	6.9	6.97	6.75	Idaho	
50	1983/11/16	16:13:5.9	19.40	-155.59	11	19.03	0.78	6.3	6.7	6.17	6.6	6.6	6.90	6.95	Hawaii	
51	1983/11/30	17:46:28.9	-6.35	71.75	10	20.61	1.23	6.6	7.1	6.85	7.5	7.7	8.00	7.18	Chugos Arch	
52	1984/2/7	21:33:36.1	-9.81	160.42	21.9	20.40	1.33	6.5	6.7	6.44	7.5	7.5	7.52	6.67	Solomon Isl.	
53	1984/3/19	20:28:39	40.38	63.37	15	19.55	0.78	6.5	6.7	6.69	7.0	7.0	7.49	7.47	Uzbekistan	

**Примечание:** для землетрясений N1 – 10  $\log_{10} t_0$  вычислены по данным  $\Delta\sigma$  Kasachaga (1984) и Purcaru and Berkhemer (1982); для остальных землетрясений N11-52 приведены данные по Global CMT Cataloge, для землетрясения N53 – данные по каталогу Землетрясений в СССР за 1984 г.

**Соотношения  $M_{Sm} - m_{bm}$  и  $M_S - m_b$ .**

На основе (19) – (20) функциональную зависимость  $M_{Sm} = M_S$  от  $m_b = m_{bm}$  можно представить следующей формулой:

$$M_{Sm} = \frac{(4/3 - 2 \cdot b_t)}{(1 - 2 \cdot b_t)} (m_{bm} + 2 a_t + 11.30) - 2a_t - 16.95. \tag{26}$$

Подставляя в (26) значения  $b_t$  и  $a_t$  по (24), для землетрясений Тянь-Шаня получим:

$$\left. \begin{aligned} M_{Sm} &= 1.59m_{bm} - 3.06, \\ m_{bm} &= 1.92 + 0.63M_{Sm}. \end{aligned} \right\} \tag{27}$$

Выражение (27) находится в хорошем согласии с корреляционной зависимостью  $M_S = 1.57 m_b - 3.05$ , представленной на рис.3, а так же с формулами (2) - (3). Для землетрясений Курильских островов и Японии за 1993-2011 гг. нами было получено [12]:  $\lg t_0 = 0.32 A_0 - 5.43$ . По этой формуле расчетную зависимость  $m_{bm}$  от  $M_{Sm}$  на основе (19) – (20) можно записать в следующем виде:  $m_{bm} = 0.52 M_{Sm} + 2.74$ , а корреляционная зависимость представлена формулой [12]:  $m_b = 0.52 M_S + 2.78$  N = 514, r = 0.84.

На рис.4 приведена корреляционная зависимость  $\lg t_0$  от  $A_0$  для землетрясений Южной Америки ( $\varphi = -40 - 0^\circ$ ,  $\lambda = -85 - 65^\circ$ ) за 1993 – 2012 гг. по глобальному каталогу CMT (N = 576, r = 0.99)

$$\lg t_0 = 0.32 (\pm 0.004) A_0 - 5.48 (\pm 0.03). \quad (28)$$

По этим данным расчетная зависимость  $m_{bm} = m_b$  от  $M_{Sm} = M_S$  выражается формулой:

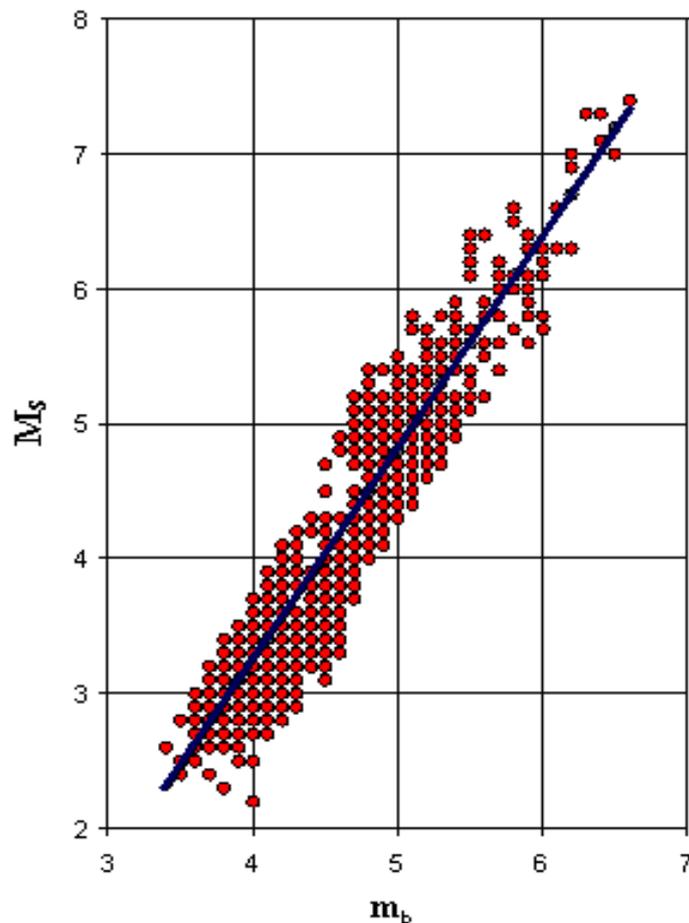
$$m_{bm} = 2.77 + 0.52 M_{Sm}, \quad (29)$$

которая находится в хорошем согласии с эмпирическим выражением ( $N = 547$ ,  $r = 0.82$ ):

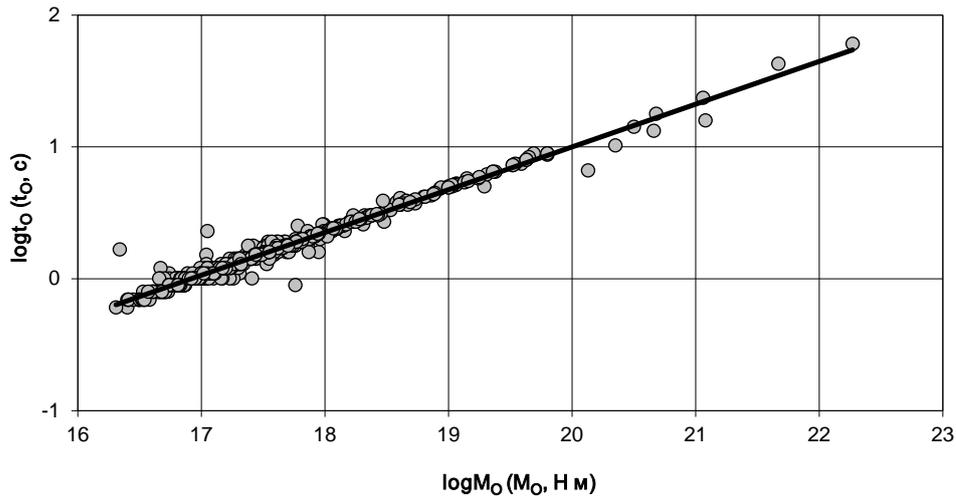
$$m_b = 2.64 (\pm 0.02) + 0.52 (\pm 0.03) M_S, \quad (30)$$

представленного на рис.5.

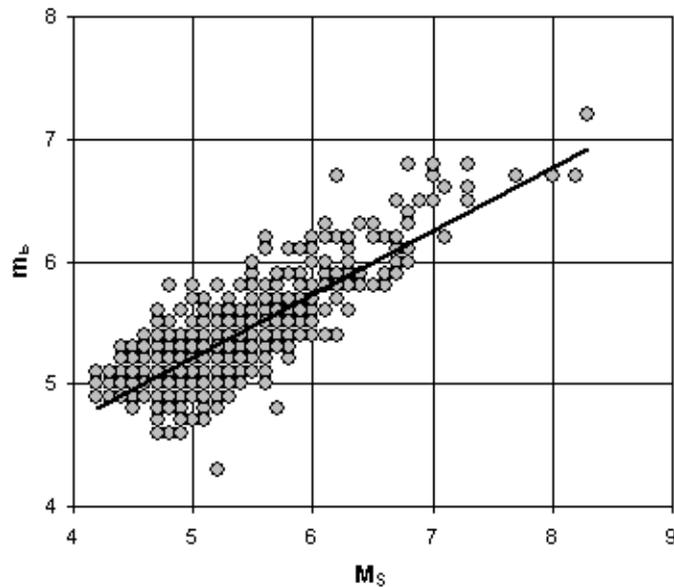
Особо следует подчеркнуть, что эмпирические и теоретические зависимости  $m_b = m_{bm}$  от  $M_S = M_{Sm}$  для крупных землетрясений земного шара полностью совпадают с обобщениями соотношениями (7) и (9). Таким образом, в зависимости от величины управляющих параметров  $a_i$  и  $b_i$  в (18) возникают многочисленные эмпирические межмагнитудные соотношения и зависимости магнитуд от  $M_0$  и энергии сейсмического излучения. Сопоставление инструментальных значений  $m_b$ ,  $\hat{m}_b$  и  $m_{PV}$  с расчетной магнитудой  $m_{bm}$  показывает, что эти разновидности магнитуд по объемным волнам функционально взаимосвязаны с сейсмическим моментом и со средним смещением по разлому  $u$ .



**Рис. 3.** Зависимость  $M_S$  от  $m_b$  для землетрясений Тянь-Шаня по данным IDC, ISC, NEIC, GS, HRV, SU, AS.  $M_S = 1.57(\pm 0.03) m_b - 3.05(\pm 0.02)$ ,  $N = 1183$ ,  $r = 0.95$ .



**Рис. 4.** Зависимость  $\log t_0$  от  $\log M_0$  для землетрясений Южной Америки (1993-2012 гг.)  
 $\log t_0 = 0.32(\pm 0.004) \log M_0 - 5.48(\pm 0.003)$ ,  $N = 576$ ,  $r = 0.99$ .



**Рис. 5.** Зависимость  $m_b$  от  $M_S$  для землетрясений Южной Америки (1993-2012 гг.)  
 $m_b = 0.52(\pm 0.03)M_S + 2.64(\pm 0.02)$ ,  $N = 547$ ,  $r = 0.82$ .

### Выводы

1. Впервые дано физическое обоснование многочисленных эмпирических формул по взаимосвязи магнитуды по объемным волнам коровых землетрясений с сейсмическим моментом, энергетическим классом и магнитудой  $M_S$ .
2. На основе обобщения большого количества инструментальных данных по коровым землетрясениям различных регионов доказано, что параметры уравнения увеличения «углового» периода (или сброшенного сейсмического напряжения) с ростом сейсмического момента являются управляющими межмагнитудных соотношений и зависимостей магнитуд от сейсмического момента и энергетического класса.
3. Численное значение магнитуды по объемным волнам коровых землетрясений пропорционально десятичному логарифму среднего смещения по разлому, выраженного в микронах.

*Работа выполнена в рамках исследований по проекту МНТЦ КР – 201*

## Литература

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология, теория и методы, т.1. пер. с английского, Москва: Мир, 1983. - 520 с.
2. Антонова Л.В., Антикаев Ф.Ф., Курочкина Р.И., Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. Основные экспериментальные закономерности динамики сейсмических волн. Москва: Наука, 1968. - 285с.
3. Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связи между магнитудами- среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология, 1990. - №6. – С. 55-63.
4. Запольский К.К., Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. Физические основы магнитудной классификации землетрясений (магнитуда и энергетическая классификация землетрясений, т. 1. Москва: ИФЗ Ан СССР, 1974. - С. 79-131.
5. Chen P., and H. Chen. Scaling Law and its applications to earthquake statistical relations // Tectonophysics, 1989. - №166. – P. 53-72.
6. Utsu T. Relationships between magnitude scales In Book International Handbook of earthquake and Engineering Seismology, 2002.- part A. Academic Press.-P.733-746.
7. Gutenberg B. and C.F. Richter. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration (second paper)//Bull. Seismol. Soc. Am., 1956 a.- P. 46, 105-145.
8. Поликарпова Л.А. О соотношениях магнитуд, определяемых по продольным, поперечным и поверхностным волнам // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений, т. 2. Москва: ИФЗ АН СССР, 1974, -P. 69-73.
9. Houston, H., and H. Kanamori. Source spectra of great earthquakes: teleseismic constraints on rupture process and strong motion.// Bull. Seism. Soc. Am., 1986. - №76. – P. 19-42.
10. Kanamori H. The energy released in great earthquakes// J. Geophys. Res., 1977. -№82. - P.2981-2987.
11. Rautian T.G., V.J. Khalturin, K. Fujita, K.G. Mackey and et al. Origins and methodology of the Russian energy K-class system and its relationship to magnitude scales// Seismol. Res. Letters, 2007. - № 78. – P. 579-590.
12. Мамыров Э. Землетрясения Тянь-Шаня: магнитуда, сейсмический момент и энергетический класс. Бишкек: Инсанат, 2012. - 234 с.
13. Мамыров Е. Relations among earthquake source parameters derived from Debye solid-body model// J.Geodynamics, 1996. - № 22. – P.137-143.
14. Мамыров Э. Особенности сейсмодинамики Тянь-Шаня. Очерки рельефа и морфотектоники Тянь-Шаня. Новосибирск: ГЕО, 2009. - С. 91-118.
15. Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes// J. Geophys. Res., 1970. - № 75. – P. 4997-5009. Correction in J. Geophys. Res. 1971.- №76. – P. 5002.
16. Zhuo, Y., and H. Kanamori. Regional variation of the short – period (1 to 10 second) source spectrum// Bull. Seismol. Soc. Am., 1987- № 77. – P. 514-529.