

УДК 550.348 (575.2) (04)

ЭНЕРГИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И МАГНИТУДА СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ТЯНЬ-ШАНЯ

Э. Мамыров – докт. геол.-мин. наук

Theoretical substantiation of correlations between energy and magnitude of body and surface waves of the Then-Shan earthquakes is given.

Введение. Со времени создания первых сейсмических станций в Центральной Азии – с 30-х годов прошлого столетия – сейсмологической службой Кыргызстана собран большой экспериментальный материал, включающий данные по параметрам более 60 тысяч землетрясений. Вместе с тем, в отличие от мировой магнитудной шкалы оценки масштабов землетрясений, в практике сейсмологических работ на территории Кыргызстана до настоящего времени используется шкала энергетического класса K_R . Величина K_R равна десятичному логарифму сейсмической энергии E_{SR} , выделенной при землетрясении и измеренной в Дж, $K_R = \lg E_{SR}$ [1]; величина E_{SR} определяется по номограмме на основе значений амплитуд продольных и поперечных упругих волн с учетом эпицентрального расстояния. В настоящее время шкала энергетического класса считается устаревшей, а с введением Аки [2] фундаментального понятия сейсмического момента M_0 и Канамори [3] понятия моментной магнитуды M_w , сейсмологи различных стран получили возможность оценивать масштабы землетрясений по единой мировой шкале. В связи с этим сейсмическими службами стран бывшего СССР неоднократно предпринимались попытки унификации энергетических и магнитудных определений масштабов землетрясений с использованием многочисленных эмпирических зависимостей [4, 5]. Учитывая важную роль взаимосвязи энергии сейсмического излучения с магнитудой для теоретических и прикладных

целей, нами сделана первая попытка обоснования статистических связей между рассматриваемыми параметрами очагов сильных землетрясений Тянь-Шаня.

Основные количественные соотношения. По Рихтеру [6, 7] магнитуда M землетрясений пропорциональна логарифму амплитуды сейсмических колебаний, а энергия упругих волн E_{GR} с данным периодом пропорциональна квадрату амплитуды колебаний:

$$\lg E_{GR} = c + 2M, \quad (1)$$

где c – константа.

Для землетрясений Калифорнии по Гутенбергу и Рихтеру зависимости между магнитудами объемных m_b и поверхностных M_S волн и излученной сейсмической энергией E_{GR} (в Дж) выражаются следующими эмпирическими формулами [8, 9]:

$$\left. \begin{aligned} m_b &= 2.5 + 0.63 M_S \\ M_S &= 1.59 m_b - 3.97 \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

$$\lg E_{GR} = 2.4 m_b - 1.2, \quad (3)$$

$$\lg E_{GR} = 4.8 + 1.5 M_S. \quad (4)$$

Величина E_{GR} равна:

$$E_{GR} = 3\pi^3 h^2 v_S t_0 \rho (a_0/T_0)^2, \quad (5)$$

где h – глубина очага, $h = 16$ км; v_S – скорость распространения поперечных упругих волн, $v_S = 3.4$ км/с; ρ – плотность, $\rho = 2700$ кг/см³; t_0 – длительность колебаний; a_0 – максимальная амплитуда колебаний и ее период T_0 , $t_0 = n T_0$, n – целое число.

Указанные выше зависимости много раз уточнялись и зависимость M_S от m_b можно выразить следующей общей формулой [10, 11]:

$$M_S = 2 m_b - \epsilon, \quad (6)$$

где величина постоянной ϵ колеблется в пределах от 4.8 до 5.6 и в среднем составляет 5.2.

На основе исследований глобальной картины сейсмического излучения очагами сильных землетрясений, произошедших в 1986–1991 гг., включая и землетрясения Тянь-Шаня, Чой и Боартвич [12] для энергии Р-волн (продольных) получили следующее выражение (E_{CB} – энергия сейсмического излучения Р-волн):

$$\lg E_{CB} = 4.4 + 1.5 M_S, \quad (7)$$

которая уточняет формулу (4) и по которой в бюллетнях Геологической службы США стали публиковаться величины E_{CB} для сильных землетрясений мира.

Формула (1) Рихтера была доказана для локальной магнитуды M_L поверхностных волн (эпицентрально расстояние от станции до очага до 600 км) по параметрам землетрясений Южной Калифорнии [13, 14]:

$$\lg E_{TH} = 1.1 + 2 M_L, \quad (8)$$

где E_{TH} – энергия сейсмического излучения по [13],

$$\lg E_{SK} = 2.05 + 1.96 M_L, \quad (9)$$

E_{SK} – энергия сейсмического излучения по [14].

Поиски в направлении получения интегральных характеристик очагов землетрясений с использованием длиннопериодных сейсмических волн привели Аки [2] к введению сейсмического момента M_0 (Н·м), равного:

$$M_0 = \mu u S, \quad (10)$$

где μ – модуль сдвига горных пород объема очага, u – среднее смещение по разлому, S – площадь разрыва.

Величина M_0 позволяет определить моментную магнитуду M_W по формуле [3, 9]:

$$M_W = 2/3 \lg M_0 - 6.07. \quad (11)$$

Между энергией сейсмического излучения E_{SR} и M_0 существует следующая зависимость [15, 16]:

$$E_{SK} = \Delta\sigma \cdot M_0 / 2\mu, \quad (12)$$

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

Зависимость между M_0 от $\Delta\sigma$ и радиуса очага r_0 выражается формулой

$$M_0 = 16/7 \Delta\sigma r_0^3. \quad (13)$$

Наши исследования показали, что в предельном упрощении энергия сейсмического излучения E_{sm} объема очага V равна кинетической энергии колеблющейся массы m ($m = \rho V$) и может быть определена из соотношения [10, 17]:

$$E_{sm} = 2\pi^2 \cdot \rho \cdot V \cdot \epsilon_m^2 \cdot f_D^2 = (8\pi^3/3) \rho \cdot r_0^3 \cdot \epsilon_m^2 \cdot f_D^2, \quad (14)$$

где ϵ_m – максимальная амплитуда колебаний; f_D – дебаевская частота акустических колебаний; $f_D = (3/4\pi)^{1/3} v_D \cdot V^{-1/3}$, v_D – скорость упругих волн по Дебаю; $f_D = 1.13 f_0$ (f_0 – частота Брюна колебаний очага).

Китайскими сейсмологами [18] было показано, что зависимость K_R от магнитуды M_S выражается следующей формулой:

$$K_R = 5.44 + 1.52 M_S, \quad (15)$$

которая подобна выражениям (4) и (7).

Обобщение большого количества экспериментальных данных по землетрясениям Центральной Азии позволило Раутиан и др. [19] получить формулу

$$\lg M_0 = 7.47 + 0.8 K_R, \quad (16)$$

которая значительно отличается от формулы Канамори (12).

Соотношение между K_R , K_{SK} , M_S , m_b , M_0 и обсуждение полученных результатов. Для анализа статистических связей между рассматриваемыми параметрами нами использован каталог землетрясений Института сейсмологии НАН КР [20] по K_R , данные Геологической службы США, Гарвардского университета и ряда публикаций по M_S , M_0 , m_b для более 400 землетрясений Тянь-Шаня за период 1865–2003 гг с $M_S \geq 4.8$ ($K_R \geq 12$)

Нами установлено впервые, что для землетрясений Тянь-Шаня в интервале $K_R = 12.2$ –18.5 между величинами K_{SK} и K_R существует тесная взаимосвязь (с коэффициентом корреляции $r = 0.86$), выражающаяся эмпирической формулой:

$$K_{SK} = 1.94(\pm 1.04) + 0.82(\pm 0.073) K_R, \quad (17)$$

которая показывает, что энергия сейсмического излучения по Раутиан всегда больше E_{SK} по Канамори, т.е. $E_{SR} > E_{SK}$. Доказано также, что зависимость $K_{SK} = K_R - 0.80$, которая более точно описывает связь K_{SK} с K_R для области $K_R \geq 15$. Величины K_{SK} были рассчитаны по известным величинам M_0 и f_0 при $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$, $v_S = 3600 \text{ м/с}$ по формуле (12) при $\mu = \rho \cdot v_S^2$, $\mu = 35.6 \text{ ГПа}$, $\Delta\sigma = 7M_0/16r_0^3$, $r_0 = 0.37 v_S \cdot f_0^{-1}$.

Эмпирическая зависимость магнитуды объемных волн m_θ от K_R по 436 данным аппроксимирована выражением:

$$m_\theta = 1.19(\pm 0.022) + 0.302(\pm 0.021) K_R. \quad (18)$$

Попытаемся дать теоретическое обоснование соотношению (18) на основе (14) и ранее опубликованных работ [10, 17].

Если считать, что объемная плотность сейсмической энергии $E_0 = E_{Sm}/V$ для сильных землетрясений является величиной постоянной и равна $3 \cdot 10^2 \text{ Па}$ [9], то замена $V = E_{Sm}/E_0$ позволяет выразить частоту в виде: $f_D = (3/4\pi)^{1/3} \cdot (E_{Sm}/E_0)^{-1/3} \cdot v_D$ и на основе (14) для максимальной амплитуды колебаний θ_m можно записать:

$$\theta_m = (2^{1/2} \cdot 3^{-1} \cdot \pi^{-2} \cdot E_0^{1/2} \cdot E_{Sm})^{1/3} \cdot \rho^{-1/2} \cdot v_D^{-1}. \quad (19)$$

Поскольку магнитуда объемных волн m_θ пропорциональна логарифму удвоенной амплитуды колебаний, выраженной в микронах (10^{-6} м , [9]), то формулу связи m_θ и θ_m при $v_D = 3850 \text{ м/с}$, $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$ и $E_0 = 3 \cdot 10^2 \text{ Па}$ на основе (19) можно выразить простым соотношением:

$$m_\theta = \lg \theta_m + 6.3 = 1 + 1/3 \lg E_{Sm} = 1 + 1/3 K_{Sm}. \quad (20)$$

Ранее было доказано, что $K_{Sm} = K_R - 0.6$ [17] и тогда замена в (20) K_{Sm} на K_R приводит к выражению:

$$m_\theta = 0.8 + 1/3 K_R. \quad (21)$$

Из представленных данных видно, что теоретическое соотношение (21) находится в хорошем согласии с эмпирической формулой (18). Следовательно, можно считать справедливым и основную теоретическую формулу (14).

Зависимость телесейсмической магнитуды M_S от энергетического класса K_R выражается формулой (коэффициент корреляции $r = 0.94$):

$$M_S = 0.61(\pm 0.03) K_R - 2.95(\pm 0.03), \quad (22)$$

которая подобна зависимости

$$M_S = 2/3 K_R - 3.6, \quad (23)$$

полученной на основе формулы Гутенберга-Рихтера (4) и $K_{Sm} = K_R - 0.6$ при равенстве K_{Sm} и E_{GR} . Формула (23) более точно описывает зависимость M_S от K_R для разрушительных землетрясений Тянь-Шаня ($K_R \geq 15$).

Эмпирическая зависимость $\lg M_0$ от K_R выражается формулой ($r = 0.94$):

$$\lg M_0 = 8.1(\pm 0.036) + 0.74(\pm 0.037) K_R, \quad (24)$$

которая совпадает с выражением (16). Из теоретической зависимости [3]:

$$\lg M_0 = 4.3 + K_R, \quad (25)$$

которая справедлива для сильных землетрясений Тянь-Шаня, при $2\mu/\Delta\sigma = 2 \cdot 10^4$ по (12) или при $\mu = 35.6 \text{ ГПа}$ величина $\Delta\sigma$ составит 3.56 МПа . Такие высокие значения $\Delta\sigma$ характерны для внутриконтинентальных землетрясений, для которых значение $\Delta\sigma$ колеблется в пределах от 2 до 10 МПа [11].

Таким образом, между энергетическими классами K_R и магнитудами M_S и m_θ , а также энергией сейсмического излучения E_{SK} и E_{Sm} ($E_{SK} \approx E_{Sm}$) существуют тесные корреляционные зависимости, которые позволяют перейти к общемировой магнитудной шкале оценки масштабов землетрясений Тянь-Шаня.

Выводы

1. Энергия сейсмического излучения по Раутиан, широко используемая в странах СНГ, дает завышенные значения этого параметра по сравнению с современными методами оценки сейсмической энергии и может быть использована только для землетрясений с повышенными значениями сброшенного сейсмического напряжения или для высокочастотных землетрясений.

2. Значения магнитуды объемных волн функционально взаимосвязаны с энергией, объемом и периодом колебаний очага землетрясений, что позволяет теоретически обосновать многочисленные эмпирические зависимости магнитуды и энергии землетрясения.

3. Полученные новые зависимости между основными параметрами очага позволяют перейти к современным количественным методам оценки масштабов землетрясений Тянь-

Шаня и оценке сейсмического воздействия на сооружения.

Работа выполнена при поддержке проекта CRDF YG2-2542-B1-03.

Литература

1. Раутиан Т.Г. Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений // Тр. ТИСС АН Таджикской ССР. – 1960. – № 7. – С. 41–96.
2. Aki K. Generation and propagation of G-waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G-wave spectrum. Bull. Earthq. Res. Inst., Tokyo University. – 1966. – 44. – P. 73–88.
3. Kanamori H. The energy release in great earthquakes // J. Geophys. Res. – 1977. – V. 82. – P. 2981–2987.
4. Гусев А.А., Мельникова В.Н. Связь между магнитудами: среднемировые и для Камчатки // Вулканология и сейсмология. – 1990. – № 6. – С. 55–63.
5. Kondorskaya N.V., Zakharova A.J., and Chepkunova L.S. The quantitative characteristics of earthquake sources as determined in the seismological practice of the USSR // Tectonophysics. – 1989. – V. 166. – P. 45–52.
6. Richter C.F. An instrumental earthquake magnitude scale // Bull. Seism. Soc. Am. – 1935. – V. 25. – P. 1–32.
7. Richter C.F. Elementary Seismology, W.H. Freeman & Co. – San Francisco, 1958. – 650 p.
8. Gutenberg B. and Richter C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration (second paper) // Bull. Seism. Soc. Am. – 1956. – V. 46. – P. 45–145.
9. Касахара К. Механика землетрясений. – М.: Мир, 1985. – 264 с.
10. Мамыров Е. Relations among earthquake source parameters derived from Debye solid-body model // J. Geodynamics. – 1996. – N 22. – P. 137–143.
11. Nuttli O.W. Average seismic source parameters relation for mid-plate earthquakes // Bull. Seism. Soc. Am. – 1983. – V. 73. – P. 521–535.
12. Choy G.L. and Boatwright J.L. Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress // J. Geophys. Res. – 1995. – V.100. – N B9. – P. 205–228.
13. Thatcher W., Hanks T.C. Source parameters of Southern California earthquakes // J. Geophys. Res. – 1973. – V. 78. – P. 8547–8576.
14. Kanamori H., Mori J., Hauksson E., Heaton T.H., Hutton L.K., Jones L.M. Determination of earthquake energy release and M_L using TER-RAscope // Bull. Seism. Soc. Am. – 1993. – V. 83. – P. 330–346.
15. Anderson J.G. Seismic energy and stress-drop parameters for a composite source model // Bull. Seism. Soc. Am. – 1997. – V. 87. – N 1. – P. 85–96.
16. Houston H., Kanamori H. Source spectra of great earthquakes: teleseismic constraints on rupture process and strong motion // Bull. Seism. Soc. Am. – 1986. – V. 76. – P. 19–42.
17. Мамыров Э. Сейсмический момент, энергия и магнитуда землетрясений Тянь-Шаня // Наука и новые технологии. – 1998. – № 3. – С. 12–24.
18. Catalogue of earthquakes in Tien Shan area. Inland earthquake, v.11, supplement June 1997. Chief Editor Zhu Lingren, Urumqi, 1997. – 183 p.
19. Раутиан Т.Г., Халтурин В.И., Закиров М.С., Земцова А.Г. Экспериментальные исследования сейсмической коды. – М.: Наука, 1987. – 142 с.
20. Джанузаков К.Д., Омуралиев М., Омуралиева А., Ильясов Б.И., Гребенникова В.В. Сильные землетрясения Тянь-Шаня (в пределах территории Кыргызстана и прилегающих районов стран Центральной Азии). – Бишкек: Илим, 2004. – 216 с.