

Академик Э. Е. Хачиян

Об одном подходе к определению величины энергии землетрясения по макросейсмическим параметрам очага землетрясения

(Представлено 6/XII 2000)

Известно, что по современным представлениям землетрясение является следствием разрыва среды из-за соприкасания двух геологических блоков (плит) с шероховатыми краями при их длительном несогласованном медленном движении в противоположных направлениях. Характер глубинных сил (тепловая конвекция в сочетании с динамическими эффектами вращения Земли и др.), заставляющих плиты совершать такие движения, еще не вполне выяснен. До землетрясения в некоторой области соприкасания среды возникают непрерывно растущие механические напряжения, обусловленные деформированием среды определенных размеров в ту и другую сторону от будущей линии разрыва.

При достижении величин механических сдвиговых напряжений предела прочности пород $\bar{\epsilon}_T$ происходит разрыв среды (землетрясение), вследствие чего накопленная потенциальная энергия превращается в кинетическую энергию в виде распространяющихся во все стороны сейсмических волн. Известен ряд эмпирических формул для определения величины энергии землетрясения. В настоящее время наиболее распространенной является следующая формула:

$$\lg E = 11.8 + 1.5M_s, \quad k = \lg E, \quad (1)$$

где E - энергия землетрясения в эргах, M_s - магнитуда землетрясения, k - энергетический класс землетрясения при выражении энергии E в джоулях.

Для дальнейшего изложения сути предлагаемого метода определения величины E будем считать, что нам известны следующие параметры очага землетрясения: длина образованного на поверхности Земли в результате землетрясения разрыва L (км), его глубина h (км) и среднее значение относительного перемещения спаренных плоскостей по линии разрыва, образованного в результате землетрясения $\bar{u}$ (м). В работе [1] указывается, что именно по величине среднего сдвига имеет место постоянный относительный сдвиг по всей глубине спаренных плоскостей разрыва. Как показали результаты измерений деформаций земной поверхности с помощью геодезической триангуляции, произведенных до и после землетрясения, величины этих деформаций по мере удаления от разрыва в ту и другую сторону постепенно уменьшаются. По-видимому, впервые результаты таких измерений для выявления механизма землетрясения и оценки его энергии были использованы Ридом для Калифорнийского землетрясения 1906 г. [2]. Много таких графических зависимостей для десятка японских и американских землетрясений приведены в фундаментальной работе по прогнозированию землетрясений Т.Рикитакэ [3]. Они дают возможность иметь определенное суждение о степени количественного уменьшения величин деформации по мере удаления от линии разрыва. На основании этих и других аналогичных результатов, приведенных в той же книге, нами предлагается следующая аналитическая зависимость уменьшения деформаций при удалении от разрыва (в перпендикулярном к разрыву направлении):

$$H = (5\bar{u} + 15) \cdot 10^3, \quad (2)$$

где $\bar{u}$ - среднее относительное перемещение (м) спаренных плоскостей в результате землетрясения, H - предполагаемое расстояние (м) от разрыва в ту и другую сторону в перпендикулярном к разрыву направлении, начиная с которого перемещение среды принимается практически отсутствующим по сравнению с перемещением у разрыва $\bar{u}$. Иная интерпретация результатов геодезических измерений

по распределению смещений на поверхности Земли содержится в работе К. Касахара [4]. Из предлагаемой зависимости (2), например, вытекает: если при землетрясении на поверхности Земли образовался горизонтальный сдвиг или взброс величиной, скажем, в $\bar{u}=1$ м, то на расстоянии $(5 \cdot 1 + 15) \cdot 10^3 = 20 \cdot 10^3$ м = 20 км и больше в правую и левую сторону от разлома деформации среды считаются практически отсутствующими (при взбросе речь идет о вертикальных перемещениях Земли). При $\bar{u}$, равном соответственно 0.5 и 2.0 м, величины предполагаемого расстояния H соответственно будут 17.5 и 25 км. При этом принимаем, что такое явление имеет место по всей длине простирания L разлома, т. е. считается, что в момент землетрясения вне прямоугольника со сторонами $2H$ и L деформации (напряжения) практически отсутствуют (рис. 1, б).

Предлагаемая зависимость (2) в отдельных случаях, исходя из механизма землетрясения, может привести к значительным погрешностям, но нам кажется, что она в целом будет соответствовать статистически средним случаям событий. Уточнению зависимости (2) могут способствовать также теоретические исследования с точки зрения теории упругости со следующей постановкой задачи: имеем две по ширине и длине бесконечные плиты единичной толщины, которые соединены между собой только на участке длиной L . Плиты подвергаются медленным поступательным в противоположном направлении движениям параллельно участку длиной L . В некоторый момент времени (непосредственно перед землетрясением) касательные напряжения по всей длине L достигают предельных значений $\bar{\tau}_T$ (обычно для горных пород принимается $\bar{\tau}_T = 50 - 100$ кг/см², для Сан-Францисского землетрясения по подсчетам Рейда $\bar{\tau}_T = 133$ кг/см²). Требуется, пользуясь методами теории упругости, при заданном $\bar{\tau}_T$ и L найти общую картину распределения касательных напряжений в плитах и с некоторой достоверностью выделить те их области (вне контура C на рис. 1), в которых можно принимать, что касательные напряжения практически отсутствуют (например, меньше $0.05 \bar{\tau}_T$). Постановку этой задачи можно несколько видоизменить, принимая за исходную заданную величину не $\bar{\tau}_T$, а относительное перемещение двух плит $\bar{u}$ (также непосредственно перед землетрясением), постоянное по всей длине L их соединения.

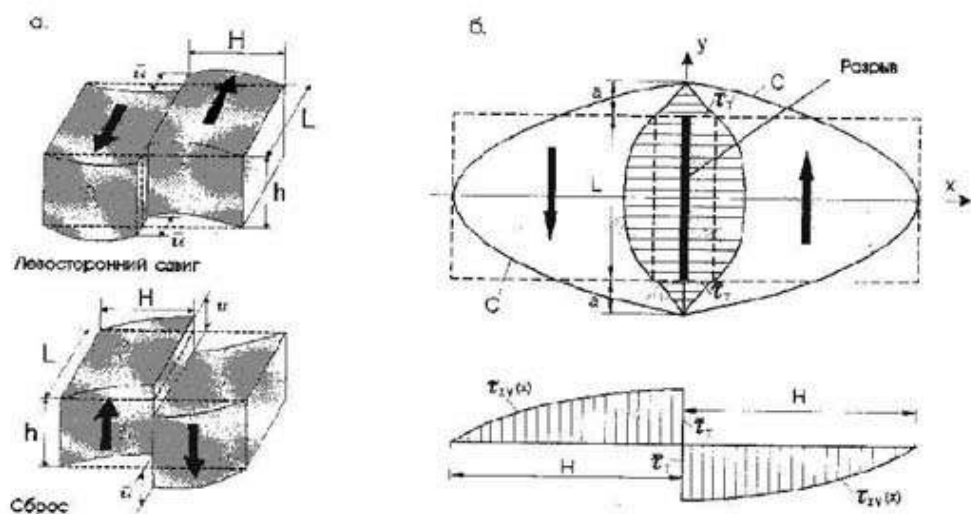


Рис. 1. Схематическое изображение деформирования среды (а) и распределения сдвиговых напряжений (б)

Теперь, принимая за основу соотношение (2), попытаемся оценить величину всей потенциальной энергии, накопленной в двух плитах (блоках) в момент начала разрыва (землетрясения). Допустим, как это показано на рис. 1, что до разрыва вся область среды, в которой возникли напряжения

(отличные от нуля), ограничивается двумя замкнутыми криволинейными площадями, образованными между неизвестной кривой C и прямой длиной $L+2a$, где a - некоторые расстояния от краев разрыва длиной L . С целью дальнейшего упрощения задачи будем считать, что напряженное состояние этой сложной области двух плит эквивалентно напряженному состоянию прямоугольной области, ограниченной сторонами $2H$ и L (показанной пунктирными линиями).

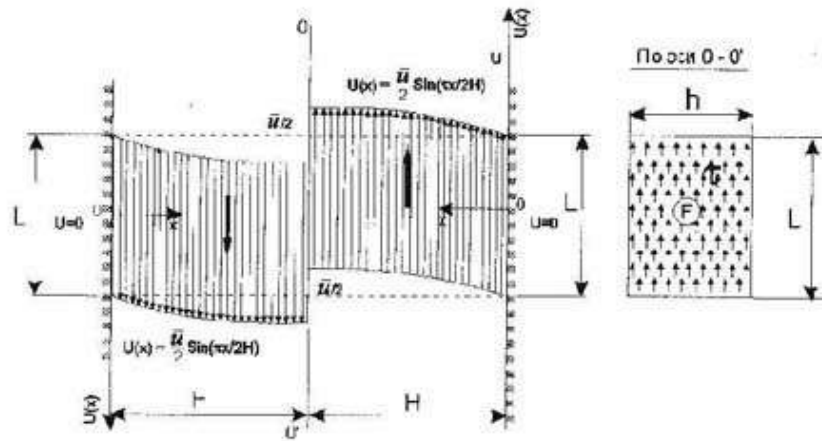


Рис. 2. Схема деформирования блоков перед разрывом.

Примем, что указанные допущения приемлемы также, когда плиты имеют не единичную толщину, а толщину h , где h глубина разрыва в перпендикулярном к линии L направлении (глубина очага землетрясения). Другими словами, будем считать, что до землетрясения все напряженно-деформированное состояние среды было сосредоточено в объемах двух параллелепипедов с поперечным сечением $L \times h$ и высотой H (рис. 1,а). Теперь задача имеет простое решение: вычислить величину потенциальной энергии деформации сдвига, накопленной в этих параллелепипедах. В момент разрыва оба параллелепипеда будут совершать свободное колебание с начальной амплитудой $\bar{u}/2$ на свободном конце (при $x = H$) и неподвижным концом на противоположной стороне (при $x = 0$), как это показано на рис. 2. При сдвиговых колебаниях стержня величина максимальной потенциальной энергии выражается формулой [5]

$$E = \int_0^H \frac{kFG}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 dx, \quad (3)$$

где $F = Lh$ площадь поперечного сечения стержня, G - модуль сдвига материала (горных пород), k' - коэффициент, величина которого принимается равной 0.83, H - высота стержня, $u(x)$ - фундаментальная функция свободных колебаний. Исходя из вышеуказанных начальных условий фундаментальную функцию $u(x)$ примем в следующем виде:

$$u(x) = \frac{\bar{u}}{2} \sin \frac{\pi x}{2H}, \quad (4)$$

удовлетворяющем двум граничным условиям задачи $u(x) = 0$, $u(H) = \bar{u}/2$. Таким образом, величина полной энергии землетрясения будет

$$E = 2 \int_0^H \frac{k' L h G}{2} \frac{\bar{u}^2}{4} \frac{\pi^2}{4 H^2} \cos^2 \frac{\pi x}{2 H} dx.$$

Произведя интегрирование, получим следующую несложную формулу:

$$E = \frac{\pi^2}{32} \frac{k' L G h}{H} \bar{u}^2. \quad (5)$$

Формула (5) дает возможность непосредственно вычислить величину энергии землетрясения при известной длине L разрыва на поверхности Земли, глубине h очага землетрясения, относительной средней подвижке $\bar{u}$ сдвинутых блоков по линии разрыва и величине H по формуле (2), характеризующей границы тех областей вокруг очага, которые подвергались наиболее умеренным механическим напряжениям к началу землетрясения. Из формул (2) и (5) вытекает, что они приемлемы только для тех землетрясений, во время которых на поверхности земли образовался разрыв, т. е. при $\bar{u} \neq 0$.

Формуле (5) можно дать также чисто механическое толкование. В самом деле, известно, что сейсмический момент землетрясения выражается формулой [2]

$$M = F G \bar{u}, \quad (6)$$

где $F = Lh$ - площадь разрыва.

По замыслу авторов формулы (6) (Аки, 1966) сейсмический момент M - это пара сил, приложенных к краям плоскости разрыва в виде очень тонкой пластины, для того чтобы система находилась в состоянии равновесия к моменту начала разрыва (землетрясения). Теперь формулу (5) можно представить в виде

$$E = \frac{\pi^2 k'}{16} M \frac{\bar{u}}{2H} = \frac{\pi^2 k'}{16} 2 \frac{M \varphi}{2} \quad (7)$$

где через φ обозначено

$$\varphi = \frac{\bar{u}}{2H}, \quad (9)$$

что представляет из себя угол наклона у неподвижного конца условного стержня протяженностью H при подвижке его другого конца на величину $\bar{u}/2$.

Учитывая, что

$$\frac{2\pi^2 k'}{16} \approx 1,$$

формула (7) окончательно примет вид

$$E = 2 \frac{M \varphi}{2}, \quad (10)$$

что представляет из себя общепринятую в механике величину (двойную) упругой потенциальной энергии для консольного стержня с сосредоточенной на свободном конце моментом. Таким образом, мы пришли к очень важному и логическому выводу: *энергия землетрясения - это полная работа сейсмического момента землетрясения М на всем наиболее напряженном пространстве протяженностью Н в ту и другую сторону от линии разрыва.*

В качестве примера по предлагаемой формуле (5) определим величину энергии Спитакского землетрясения 7 декабря 1988 г. Согласно [1] для Спитакского землетрясения $L = 38$ км, $h = 11$ км, $u_{\max} = 2$ м, $\bar{u} = 1.22$ м.

Значение Н по формуле (2) будет

$$H = (5 \cdot \bar{u} + 15) \cdot 10^3 = (5 \cdot 1.22 + 15) \cdot 10^3 = 21.1 \cdot 10^3 = 21.1 \text{ км.}$$

Принимая $G = 3 \cdot 10^{11}$ дин/см², по формуле (5) для Е получим

$$E = \frac{9.85 \cdot 0.83 \cdot 38 \cdot 10^5 \cdot 11 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{11} \cdot (122)^2}{32 \cdot 21.1 \cdot 10^5} = 0.226 \cdot 10^{22} \text{ эрг} = 0.226 \cdot 10^{15} \text{ Дж,}$$

следовательно, энергетический класс Спитакского землетрясения будет

$$k = \lg E = \lg 0.226 \cdot 10^{15} = 15 + \lg 0.226 = 15 - 0.64 = 14.36.$$

Вычисленные аналогичным образом по формуле (5) величины энергетического класса k для 44 землетрясений приведены в таблице, все данные которой заимствованы из весьма содержательной статьи Д. Л. Веллса и К. Дж. Коппершмита [1], в которой собраны данные о 244 сильных землетрясениях за 1857-1993 гг. Мы использовали только землетрясения, для которых имелись все необходимые параметры для расчета энергии Е по формуле (5). В таблице приведены также величины энергетического класса k этих же землетрясений по эмпирической формуле (1). По данным таблицы, величины энергетического класса, вычисленные по формуле (5), подчиняются общеизвестной закономерности, согласно которой чем больше протяженность разрыва на

N	Страна	Землетрясение в	Дата землетрясения	Тип разрыва	Магнитуда землетрясения, M_s	Протяженность разрыва L, км	Глубина разрыва h, км	Максимальный сдвиг $u_{\max}$, м	Средний сдвиг $\bar{u}$, м	Величина Н по (2), км	Энергетический класс k землетрясения	
											по формуле (1)	по формуле (5)
1.	США	Fort Tejon	09.10.1857	RL	8.3	297	12	9.4	6.4	50.84	17.25	16.34
2.	США	Owens Valley	26.03.1872	RL-N	8.0	108	15	11	6.0	45	16.8	15.99
3.	Япония	Nobi	27.10.1891	LL	8.0	80	15	8.0	5.04	40.25	16.8	15.76
4.	Япония	Rikuu	31.08.1896	R	7.2	40	21	4.4	2.59	27.95	15.6	15.18
5.	США	San Francisco	13.01.1906	RL	7.8	432	12	6.1	3.3	31.5	16.5	16.13
6.	США	Pleasant Valley	03.10.1915	N	7.6	62	15	5.8	2.0	25	16.2	15.05
7.	Китай	Kansy	16.12.1920	LL	8.5	220	20	10.0	7.25	51.25	17.55	16.53
8.	Япония	North Izu	25.11.1930	LL-R	7.3	35	12	3.8	2.9	29.5	15.75	14.96
9.	Китай	Kehetuohai	10.08.1931	RL	7.9	180	20	14.6	7.38	51.9	16.65	16.45
10.	Турция	Erzihcan	26.12.1939	RL	7.8	360	20	7.5	1.85	24.25	16.5	15.88
11.	США	Imperial Valley	19.05.1940	RL	7.2	60	11	5.9	1.5	22.5	15.6	14.7
12.	Китай	Damxung	18.11.1951	RL	8.0	200	10	12.0	8.0	65	16.8	16.18
13.	США	Dixie Valley	16.12.1954	RL-R	6.8	45	14	3.8	2.1	25.5	15.0	14.92
14.	Турция	Abant	26.05.1957	RL	7.0	40	8	1.65	0.55	17.75	15.3	13.62
15.	Монголия	Gobi-Altai	04.12.1957	LL	7.9	300	20	9.6	6.54	47.7	17.65	16.61
16.	США	Hebgen Lake	18.08.1959	N	7.6	45	17	6.1	2.14	25.7	16.2	15.0
17.	Иран	Dasht-e-Bayaz	31.08.1968	LL	7.1	110	20	5.2	2.3	26.5	15.45	14.52
18.	Турция	Gediz	28.03.1970	N	7.1	63	17	2.8	0.86	19.3	15.45	14.5
19.	США	San Fernando	09.02.1971	R-LL	6.5	17	14	2.5	1.5	22.5	13.75	14.26
20.	Китай	Luhuo	06.02.1973	LL	7.3	110	13	3.6	1.3	21.5	15.75	14.92
21.	Гватемала	Motagua	04.02.1976	LL	7.5	257	13	3.4	2.6	28.0	16.05	15.18
22.	Турция	Caldiran	24.11.1976	RL	7.3	90	18	3.5	2.05	25.25	15.75	16.3
23.	Иран	Bod-Tangol	19.12.1977	RL	5.8	14	12	0.3	0.12	15.6	13.5	12.05

24.	Греция	Thezzaloniki	20.06.1978	N	6.4	28	14	0.22	0.08	15.4	14.4	12.09
25.	Иран	Tabas-e-Golshan	16.09.1978	R	7.5	74	22	3.0	1.5	22.5	17.05	16.09
26.	США	Homestead Valley	15.03.1979	RL	5.6	6	4	0.1	0.05	15.25	13.2	9.47
27.	Австралия	Cadoux	02.06.1979	R	6.1	16	6	1.5	0.5	17.5	13.95	13.0
28.	США	El Centro	15.10.1979	RL	6.7	51	12	0.8	0.18	15.9	14.85	12.97
29.	Иран	Koli	27.11.1979	LL-R	7.1	75	22	3.9	1.2	21.0	15.45	14.93
30.	Алжир	El Asman	10.10.1980	R	7.3	55	15	6.5	1.54	22.7	15.75	14.81
31.	Италия	South Apennines	23.11.1980	N	6.9	60	15	1.15	0.64	18.2	15.15	14.81
32.	Греция	Corinth	25.01.1981	N	6.4	19	16	1.5	0.6	18.0	14.4	13.67
33.	Греция	Corinth	04.03.1981	N	6.4	26	18	1.1	0.6	18.0	14.4	13.85
34.	США	Borah Peak	28.10.1983	N-LL	7.3	33	20	2.7	0.8	19.0	15.75	14.23
35.	Алжир	Constantine	27.10.1985	LL	5.9	21	13	0.12	0.1	15.5	13.65	12.12
36.	Австралия	Marryat Creek	30.03.1986	R-LL	5.8	13	3	1.3	0.5	17.5	13.5	12.62
37.	Греция	Kalamata	13.09.1986	N	5.8	15	14	0.18	0.15	15.75	13.5	12.35
38.	Новая Зеландия	Edgecumbe	02.03.1987	N	6.6	32	14	2.9	1.7	23.5	14.7	14.62
39.	США	Superstition Hills	24.11.1987	RL	6.6	30	11	0.92	0.54	17.5	14.7	13.62
40.	Австралия	Tennant Creek	22.01.1988	R	6.3	13	9	1.3	0.63	18.15	14.25	13.29
41.	Китай	Lancand Gengma	06.11.1988	RL	7.3	80	20	1.5	0.7	18.5	15.75	14.51
42.	Армения	Spitak	07.12.1988	R-RL	6.8	38	11	2.0	1.22	21.1	15.0	14.36
43.	Канада	Uganda	25.12.1989	R	6.3	10	5	2.0	0.8	19.0	14.25	13.11
44.	США	Landers	28.06.1992	RL	7.6	62	12	6.0	2.95	29.75	16.2	15.22

Примечание: RL - правосторонний сдвиг, LL- левосторонний сдвиг, R – взброс, N – сброс. Истинное значение энергии землетрясения $E=10^k$ в джоулях или $E=10^{k+7}$ в эргах.

поверхности Земли, глубина очага, относительная подвижка и величина магнитуды землетрясения, тем больше величина выделяемой им энергии. Кроме того, важно отметить также, что порядки величин энергетического класса k , вычисленные по предлагаемой формуле и по эмпирической формуле (1), за исключением трех землетрясений (в основном с очень малыми величинами относительной подвижки по линии разрыва), очень близки, причем, как правило, по предлагаемой формуле для всех рассмотренных землетрясений эти значения k меньше, чем по формуле (1). Среднее отклонение этих величин (за исключением вышеотмеченных несильных землетрясений) составляет порядка 0.9, т. е. около одного класса. Однако мы считаем, что это отклонение нельзя принимать как меру погрешности предлагаемой формулы (5) по следующим соображениям. Во-первых, известно, что магнитуды, вычисленные для одного и того же землетрясения, по данным разных станций различаются на несколько десятых долей единицы (известны случаи, когда магнитуды одного землетрясения отличались на целых 1-2 единицы), особенно это касается магнитуд исторических землетрясений, и средняя погрешность при их вычислениях принимается равной около 0.5 единицы. Немалую роль здесь играет также тип сейсмической волны (продольная, поперечная, поверхностная), используемой для вычисления магнитуды. Говоря о целесообразности введения понятия магнитуды землетрясения, сам Рихтер писал: "Я ставлю себе целью получить чисто инструментальную шкалу для грубого разделения сильных, средних и слабых толчков" [6].

Во-вторых, использованная в настоящей статье зависимость (1) между величиной выделяемой при землетрясении энергии E и его магнитудой M_S является эмпирической и также считается грубой для оценки энергии землетрясения. Вот что пишет об этом известный сейсмолог Б.Болт: "Соблазнительно было бы найти корреляцию между величиной энергии, высвобождающейся при землетрясении, и его размерами, определенными по шкале магнитуд. Хотя это и очень грубая зависимость (речь идет о формуле (1) данной статьи), тем не менее она полезна для оценки энергии, действительно выделяющейся при землетрясении" [6]. Кроме того, в литературе известен ряд зависимостей типа (1), которые значительно отличаются от используемой нами формулы (1). В частности, зависимость между E и M_S , предложенная Рихтером, имела вид [7]

$$\lg E = 11.4 + 1.5M_S, \quad (11)$$

а коллегой Рихтера Гутенбергом была предложена следующая нелинейная зависимость [7, 8]:

$$\lg E = 9.9 + 1.9M_S - 0.024M_S^2. \quad (12)$$

Нетрудно убедиться, что величина энергетического класса по формуле (11) будет на 0.4 единицы

ниже, чем по формуле (1), а по формуле (12) соответственно для магнитуд от 5 до 8 от 0.5 до 0.23 единицы ниже, чем по формуле (1). Ясно, что если бы сравнение величин энергетического класса по предлагаемой формуле (5) производилось по формулам (11) и (12), то среднее отклонение между ними не превосходило бы 0.4 единицы. Кроме того известно, что определение величины глубины разрыва h также связано с определенными погрешностями. Естественно принимать, что на величину энергии E повлияют также погрешности, связанные с установлением осредненной величины относительной подвижки $\bar{u}$ в зависимости от ее измеренного максимального значения $u_{\max}$. В некоторых работах, в частности в [4], значение модуля сдвига G , входящего в формулу (5), принимается равным не $3 \cdot 10^{11}$, а $5 \cdot 10^{11}$ дин/см². При таком значении G величины энергетического класса k , приведенные в таблице, для всех рассмотренных землетрясений увеличатся на $\lg 5/3 = 0.22$ единицы.

Исходя из вышеизложенного, мы склонны думать, что несущественные отклонения между величинами энергетического класса приведенных в таблице землетрясений по формуле (5) и по формуле (1) не следует принимать как меру погрешности, обусловленную только формулой (5). Это, конечно же, не свидетельствует об абсолютной точности предлагаемой формулы (5), которая, являясь результатом совершенно другого подхода к определению величины энергии землетрясения, безусловно нуждается в дальнейшей корректировке.

Можно только констатировать, что величина энергии землетрясения, вычисленная предлагаемым способом, будет представлять из себя ее минимальное значение, так как при вычислении не учитывались слабые напряжения, которые накапливаются в удаленных от разрыва пространствах. Кроме того, во время большинства землетрясений разделенные блоки подвергаются более сложным движениям (см. таблицу), чем принятые выше однокомпонентные, и, следовательно, небольшая часть полной энергии землетрясения, не учитываемая по формуле (5), будет излучаться по направлениям этих движений.

Институт геологических наук НАН РА

Литература

1. Wells D.L., Coppersmith K. J. - Bull. the Seismological Society of America. 1994. V. 84. № 4. P. 974-1002.
2. Сейсмический риск и инженерные решения. Под ред. Ломнитца Ц. и Розенблюта Э. М. Недра. 1981. 378 с.
3. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М. Мир. 1979, 388 с.
4. Касахара К. Механика землетрясений. М. Мир. 1985. 264 с.
5. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов. М. Мир. 1976. 670 с.
6. Болт Б.А. Землетрясения: общедоступный очерк. М. Мир. 1981. 256 с.
7. Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М. ИЛ. 1963. 670 с.
8. Гир Дж., Шах Х. Зыбкая твердь. Что такое землетрясение и как к нему подготовиться. М. Мир. 1988. 220 с.

Ակադեմիկոս Է. Ե. Խաչիյան

**Երկրաշարժի օջախի մակրոսեյսմիկ պարամետրերով
նրա էներգիայի որոշման մի մոտեցման մասին**

Երկրաշարժի ժամանակ անջատված էներգիայի մեծության հաշվարկման համար հոդվածում առաջարկվում է մի նոր տարբերակ՝ օգտագործելով երկրի մակերևույթի վրա երկրաշարժի առաջացրած խզվածքի երկարության L , խզվածքի լայնության h ու երկու տրոհված հատվածամասերի հարաբերական միջին տեղաշարժի $\bar{u}$ մեծությունները: Ելնելով տարբեր երկրաշարժերի ժամանակ գեոդեզիական եղանակներով չափված երկրի մակերևույթի առանձին տեղամասերի տեղափոխությունների (խզվածքից հեռանալիս) փոքրացման տվյալներից՝ հոդվածում առաջարկվում է (2) առնչությունը, որտեղ H -ը խզվածքից այն հավանական հեռավորությունն է, որից հետո երկրի մակերևույթի տեղափոխությունները կարելի է ընդունել հավասար զրոյի: Ընդունելով, որ երկրաշարժի ժամանակ անջատված կլինետիկ էներգիան համագոր է $L \times h \times H$ երկու զուգահեռանիստերում սարքի դեֆորմացիայի հետևանքով կուտակված պոտենցիալ էներգիային, հոդվածում ստացված է երկրաշարժի էներգիայի հաշվարկման (5) բանաձևը: Բերվում է առաջարկված տեսական բանաձևով և գոյություն ունեցող էմպիրիկ բանաձևերով (1) հաշվարկված էներգիաների մեծությունների համադրություններ, որոնք հաստատում են առաջարկվող եղանակի բավարար ընդունելիությունը: