

ЗАМЕТКИ К МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВОВ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

А.В. Сторчеус

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006,
e-mail: sav@kscnet.ru*

Введение

Энергия – одна из важнейших динамических характеристик сейсмических волн. Излишне доказывать важность количественных оценок энергетики любого физического процесса. Наука, в том числе и сейсмология, считается точной, если оперирует количественными величинами (кг, м, с), характеризующими физический процесс. Как отмечает Ризниченко Ю.В. в [12]: «В характеристике параметров землетрясений на первом месте стоит сейсмическая энергия как самая главная сейсмическая характеристика очага землетрясения. Если условно принять, что величину землетрясения надо характеризовать лишь одним числом, то лучшей физической величины, чем сейсмическая энергия, пожалуй, не сыскать». Но «... существующие представления о методах расчета энергии землетрясения не вполне устойчивы и иногда дают основания сомневаться даже в порядке получаемых оценок» [8].

Точность определения сейсмической энергии важна не только для характеристики силы сотрясений, но и потому, что ее значение используется во многих формулах при исследовании физики землетрясений. К примеру, значение энергии входит в широко известное выражение $lgN = a - \gamma lgE$ (закон повторяемости Гуттенберга-Рихтера), где N - число землетрясений с энергией E , происшедших в некотором районе за определенный период времени, γ и a - константы. По энергии землетрясения определяется энергетический класс землетрясения: $Ks = lgE$, который используется в формуле, связывающей класс землетрясения с его магнитудой: $M = a * Ks - b$. При модельных экспериментах определение энергии сейсмических волн в процессе трещинообразования важно при изучении физики и геометрии очага [6,9].

Но в сейсмологии чаще используется другая энергетическая характеристика – магнитуда. По магнитуде можно легко и быстро сравнивать силу землетрясений. Но магнитуда, как известно, относительная величина. Магнитуда, как энергетическая характеристика землетрясений, тоже не лишена недостатков. «В зависимости от рассматриваемого типа волн, компоненты колебаний, измеряемой величины (A или A/T), типа аппаратуры и ряда других обстоятельств, вплоть до района исследований и имени автора, можно говорить о той или иной конкретной шкале магнитуд. В настоящее время таких шкал имеется уже несколько десятков и рождаются все новые. Нередко они плохо согласуются между собой» [12].

Сейсмическая энергия E – это энергия упругих сейсмических волн, излученных очагом [8]. В России понятие сейсмической энергии ввел Б.Б. Голицын в 1912г. [13]. Сейсмическая энергия определяется в сейсмологии [7] как энергия $E(\Delta)$, перенесенная пакетом сейсмических волн, ограниченном по времени и пространству, на расстояние Δ от эпицентра. Для объемных волн – это энергия, перенесенная пакетом сейсмических волн через поверхность S сферы радиуса Δ с центром в гипоцентре за промежуток времени, равный продолжительности прохождения пакета сейсмических волн через S . Эта энергия выражается в виде интеграла от проекции вектора плотности потока энергии q на нормаль к поверхности S , по площади этой поверхности и по времени, причем интеграл по времени можно взять в бесконечных пределах, т.к. вклад в него дадут только те моменты времени, для которых смещение точек S не равно нулю:

$$E(\Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int \vec{q} d\vec{S} dt. \quad (1)$$

Расчет энергии объемных волн ведется обычно по формуле, выведенной Цепритцем и Вихертом в 1912 г., (формула Цепритца-Вихерта) [13]:

$$E^{P,S} = 8\pi^3 R^2 c \rho \exp(kR) \frac{\sin \Delta \sin e_0}{de_0 / d\Delta} \sum_n \frac{A^2}{T^2} t_e, \quad (2)$$

где R – расстояние до эпицентра, c – скорость сейсмических волн, k – коэффициент затухания, ρ – плотность среды, A – амплитуда сейсмических волн, T – период сейсмической волны, t_e – длительность землетрясения, а экспоненциальный множитель учитывает затухание волн с расстоянием вследствие их расхождения и рассеяния.

Множитель $\frac{\sin \Delta \sin e_0}{de_0 / d\Delta}$ учитывает геометрические особенности распространения волн и расхождение сейсмических лучей, Δ – расстояние, град., e_0 – угол выхода волны.

В России впервые формулу для оценки сейсмической энергии E , излучаемой очагом, предложил использовать Б.Б. Голицын в 1912 г. [13]:

$$E = 4\pi^3 R^2 c \rho \exp(kR) \sum_n \frac{A^2}{T^2} t_e, \quad (3)$$

В сейсмологии принято определять энергию колебательного движения среды по кинетической энергии, так как на практике проще оценить скорость и период колебаний, чем определять энергию упругих деформаций среды при прохождении сейсмических волн. Для определения энергии землетрясений в сейсмологии используется метод сравнения амплитуд происшедшего землетрясения со смещением почвы в эталонных землетрясениях, энергия которых тщательно рассчитывается по формулам (1)- (3).

На практике сейсмическую энергию землетрясений обычно определяют по специальным номограммам [14], используя такие параметры записей землетрясений, как A_{max} , $T(A_{max})$ и S-P – разность времен прихода P и S – волн на сейсмическую станцию. Номограммы строят по тем же параметрам эталонных землетрясений, сейсмическую энергию которых определяют по формулам (1) и (2). Для облегчения вычисления сейсмической энергии по этим формулам были даже сконструированы приборы [1], облегчающие вычисление интеграла (или суммы амплитуд), входящего в эти выражения. Как правило, сейсмическая энергия определяется по энергии S – волн, так как считается, что S – волны переносят значительно большую часть сейсмической энергии, чем P – волны [14].

Целью настоящей работы является анализ используемой в многочисленных публикациях методики расчета энергии сейсмических волн от землетрясений и взрывов по данным удаленных сейсмических станций.

Анализ формул расчета сейсмической энергии

Любая математическая формула, полученная при исследовании природных физических явлений или процессов, описывает некую идеализированную модель физического процесса. Идеализация заключается в использовании некоторых условий, упрощающих изучаемый процесс или природное явление после его феноменологического описания. Основное правило при таком подходе заключается в том, чтобы полученное математическое решение соответствовало введенным условиям.

Проанализируем подробнее формулы (1) - (3) и условия, при которых они были получены. Обратим внимание на вторую часть выражений (1) - (3) - сомножитель под знаком Σ . Проведем формальный анализ этой части.

При выводе этих формул предполагалось, что:

1. Сейсмическая энергия излучается из очага землетрясения в виде упругих колебаний в упругой среде,
2. Энергия от очага к земной поверхности передается вдоль лучей,
3. Колебания гармонические,
4. Энергия сейсмических волн в источнике распределена для объемных волн сферически-симметрично.

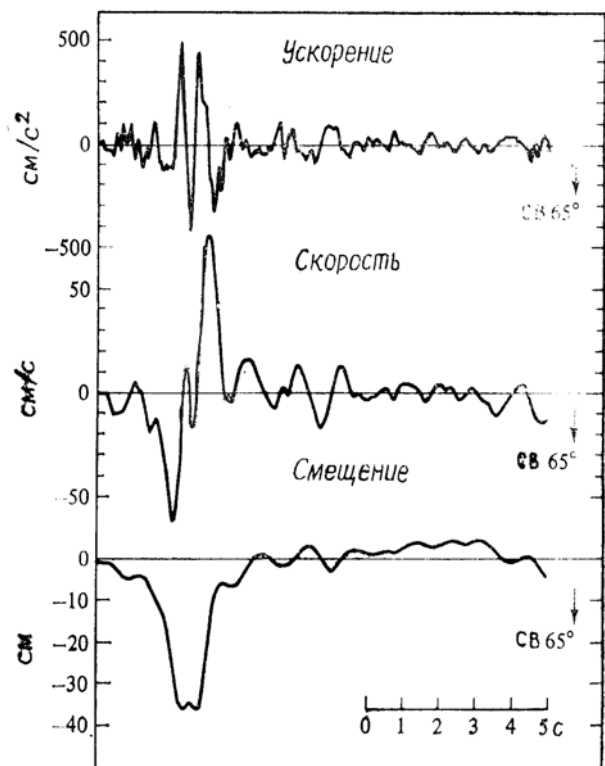


Рис. 1. Скорость и смещение грунта, полученные интегрированием перпендикулярной компоненты акселерограммы землетрясения Паркфилд, 1966г. (рис. из [5])

Упругую среду можно моделировать решеткой, состоящей из некоторых материальных частиц, обладающих инерционными свойствами, соединенных упругими элементами – пружинками. Упругие колебания такой среды можно представить по аналогии с колебаниями маятника на упругой пружине.

Рассмотрим энергию сейсмических волн землетрясений как упругих колебаний среды в некотором пункте регистрации на удалении от источника. Проанализируем энергию колебаний в двух основных типах сейсмических сигналов:

- 1- с резким вступлением волны S с максимальной амплитудой A_{max} и последующим спаданием амплитуды сигнала по экспоненциальному закону. Этот случай соответствует затухающим колебаниям маятника с трением. Энергия колебаний такого маятника определяется как $E_{max} \sim A_{max}^2/T^2$
- 2- постепенное нарастание амплитуды сигнала до A_{max} и затем спадание амплитуды по экспоненциальному закону.

Джеффрис и, впоследствии, Буллен [2] полагали, что сейсмическая энергия в очаге землетрясения выделяется в виде двух одиночных импульсов P и S волн. Буллен пишет, что вблизи источника импульс длится не более нескольких секунд, после этого смещение приходит в точку равновесия. А наблюдаемые после вступлений P и S цуги волн обусловлены преимущественно неоднородностью Земли. Их предположения нашли подтверждение при регистрации в Паркфилде в 1966 г. землетрясения с $M = 7$ на разломе Сан-Андреас в 60-ти км от пункта регистрации (рис. 1).

Кинетическую энергию колебаний в классической физике можно определить через работу, затрачиваемую на генерацию этих колебаний. Если мы хотим характеризовать сейсмическую энергию исходя из работы, которая совершается силами при упругих смещениях, тогда следует учитывать, что работа совершается только на отклонение от состояния равновесия.

Эти типы землетрясений приведены на рис.2А и рис.3А. Форму землетрясений будем симулировать квазисинусоидальными сигналами с постоянным периодом (Рис. 2Б и Рис. 3Б).

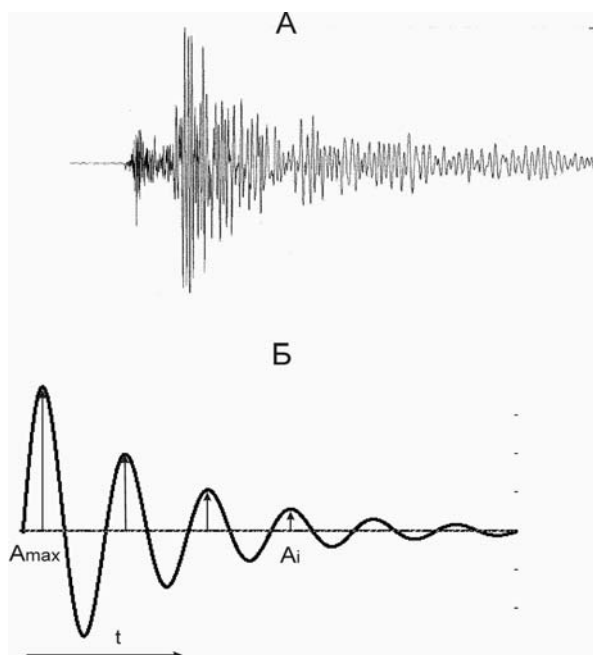


Рис. 2. Землетрясение 1-го типа.

Вначале рассмотрим случай, когда источник землетрясения простой – одноактный срыв краев трещины по границе скольжения (Рис.2). Будем полагать, что время срыва и движения краев трещины мало (сравнимо с преобладающим периодом сейсмических колебаний). Это справедливо для слабых и для некоторых сильных землетрясений. Землетрясение в Паркфилде в 1966 г. подтверждает это.

Как известно, такой одиночный импульс при распространении в упругой среде, окружающей трещину, порождает цуг затухающих колебаний. Первоначально энергия землетрясения была запасена в форме упругих деформаций среды, которая после срыва реализовалась в колебательное движение массы среды, окружающей трещину разрыва, по которой происходит сдвиг.

При колебаниях кинетическая энергия движения в точке равновесия будет равна потенциальной энергии упругих деформаций до момента времени начала движения. Переход кинетической энергии движения частиц среды в потенциальную энергию упругих деформаций при линейно-упругих свойствах среды происходит по синусоидальному (или, с учетом затухания, квазисинусоидальному $A = \exp(-at) * A_{max} \sin(\omega t)$) закону. Максимумы потенциальной и кинетической энергии при упругих колебаниях сдвинуты на $1/4$ периода колебаний. Энергия колебаний прямо пропорциональна величине импульса и пропорциональна амплитуде максимального колебания (отклонения от состояния равновесия): $E \sim (A/T)^2_{max}$. При этом хвост землетрясения после прихода максимальной фазы волны – это затухающие свободные колебания среды, на которые накладываются отраженные и преломленные волны. Экспоненциальный закон затухания сигнала в этой части землетрясения подтверждает это предположение.

Теперь рассмотрим второй тип землетрясений в некотором пункте регистрации (Рис.3). В этом случае происходит подпитка энергии колебаний в пункте регистрации или за счет энергии источника или за счет колебательной энергии следующих за первым вступлением волн, что и ведет к увеличению амплитуды колебаний. Нарастание амплитуды происходит постепенно до A_{max} . Это означает, что к энергии каждого i -го колебания $E_i = A_i^2 / T^2$ нужно добавить некоторое количество энергии ΔE_i , чтобы последующее колебание имело большую амплитуду A_{i+1} и энергию $E_{i+1} \sim A_{i+1}^2 / T^2$, чем предыдущее: $\Delta E_i \sim A_{i+1}^2 / T^2 - A_i^2 / T^2$. И так до достижения максимальной амплитуды колебаний: $E_{max} = \Sigma \Delta E_i \sim A_{max}^2 / T^2$. Из последней формулы следует, что для определения энергии сейсмических волн землетрясения следует суммировать не всю энергию каждого колебания, а только их разности.

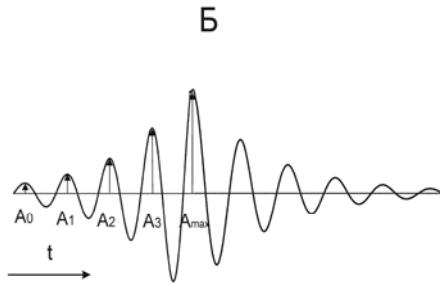
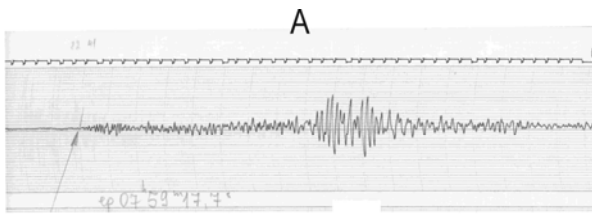


Рис. 3. Землетрясение 2-го типа

Поэтому было бы ошибочным вычислять кинетическую энергию упругих колебаний в упругой среде, суммируя энергию каждого колебания. В таком случае, при отсутствии потерь энергии колебания в упругой среде происходили бы бесконечно долго, и энергия сейсмических волн была бесконечно большой. Суммирование же означает, что колебания происходят не в упругой среде, а в вязкопластичной, где на каждое колебание затрачивается дополнительная часть энергии источника. Это противоречит условию 1.

Кроме того, учет энергии волн, приходящих после первого вступления и состоящих из суперпозиции волн отраженных и преломленных, нарушает предположение о симметричности распространения сейсмической энергии в

пространстве, что противоречит условию 4. Нарушается также и условие 2. Ошибка заключается еще в том, что производится не только суммирование по всем амплитудам, но еще и умножается на время. Вот как описывает Нурмагамбедов А. [10] процесс расчета энергии сейсмических волн: «...длительность сигнала, наблюдаемая на сейсмограмме, определяется не очаговым процессом, а результатом реверберации в неоднородной среде, наложением вторичных и рассеянных волн. Длительность сигнала, принятая в нашем расчете, была равна 1, 5, 15, 25 и 40 сек для расстояний 10, 30, 110, 260 и 570 км соответственно». Автор, заведомо зная механизм и природу формирования цуга спадающих по амплитуде сейсмических волн, тем не менее учитывает в расчете энергии препомленные и обменные волны, нарушая тем самым условия 2 и 4.

Таким образом, формулы (2) и (3) для определения сейсмической энергии в источнике приобретают вид:

$$E^{P,S} = C * \left(\frac{A}{T}\right)_{\max}^2 * \frac{T}{2}, \quad (4)$$

где C – множитель перед знаком \sum в формулах (2) и (3).

Или, с учетом вышесказанных замечаний, формула Цоппритца-Вихерта (2) преобразуется в формулу:

$$E^{P,S} = 16\pi^3 R^2 c \rho \exp(kR) \frac{\sin \Delta \sin e_0}{de_0 / d\Delta} \left(\frac{A}{T}\right)_{\max}^2 T, \quad (5)$$

а формула Голицына (3) – в формулу:

$$E = 8\pi^3 R^2 c \rho \exp(kR) \left(\frac{A}{T}\right)_{\max}^2 T. \quad (6)$$

Значение сейсмической энергии, вычисленное методом суммирования энергии всех колебаний на записи землетрясения, в зависимости от длительности цуга волн, используемого в расчетах, получается завышенным на 1-2 порядка в сравнении с рассчитанным по формулам (5) и (6). Конечно, полученное по формулам (2) и (3) значение сейсмической энергии каким-то образом характеризует энергию упругих колебаний землетрясения, но в большей степени оно характеризует добротность среды и для исследования физики очага землетрясений правомерность ее использования представляется весьма сомнительным.

В подтверждение вышесказанного можно привести в качестве примера лунотрясения, которые длятся иногда до 4-х часов и более при сравнительно слабом источнике, их вызвавшем. Таким источником, к примеру, служили космические модули, сбрасываемые американскими исследователями на Луну с целью изучения ее внутреннего строения. Такая большая продолжительность лунотрясений объясняется тем, что добротность Луны на 2 порядка выше, чем у Земли. И, конечно, используемые в настоящее время способы расчета сейсмической энергии дадут ее величину, превышающую энергию самого импульсного источника колебаний. Энергия падения модулей не превышала 10^9 Дж, а энергия сейсмических колебаний, подсчитанная по используемой в современной сейсмологии методике, получается в несколько раз больше кинетической энергии падения космического модуля. Вывод же формул для расчета сейсмической энергии и других законов сейсмологии специально для Луны и других планет, отличных от земной сейсмологии, по-видимому, представляется необоснованным хотя бы потому, что физические законы должны быть универсальны для всей Вселенной.

Таким образом, возникает вопрос о правильности расчетов энергии эталонных землетрясений и других соотношений при любых расчетах, используемых абсолютное значение сейсмической энергии.

Также представляется сомнительным использовать эту методику для оценки землетрясений вызванных импульсным источником типа химического или ядерного взрыва, когда энергия закачивается в упругую среду в течение очень короткого отрезка времени. Такие взрывы вызывают продолжительные цуги колебаний объемных волн и поверхностных (Рис. 4).

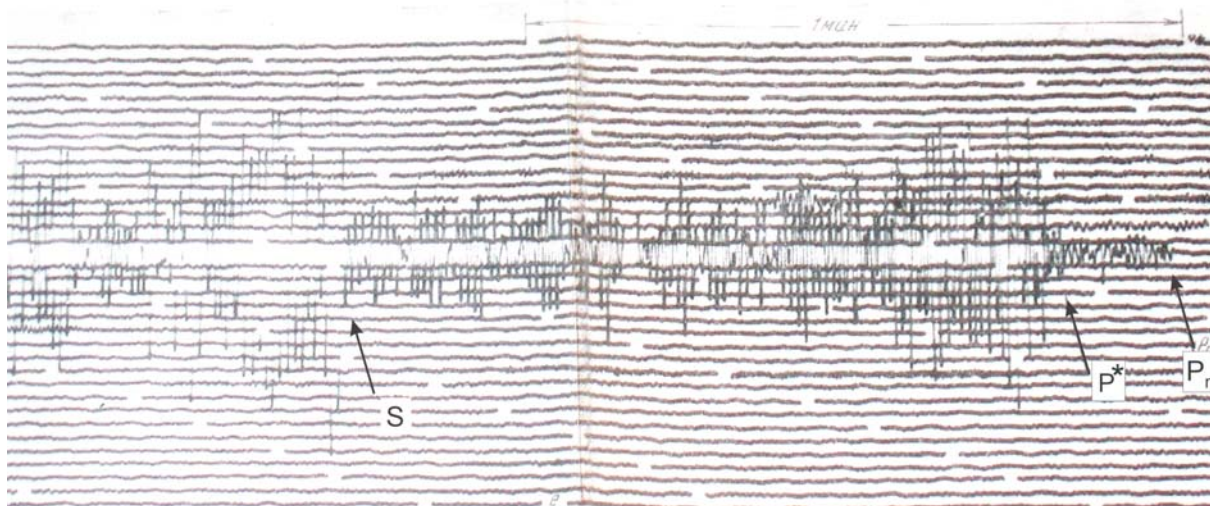


Рис. 4. Сейсмический сигнал ядерного взрыва на удалении 600 км.
Рисунок заимствован из [11].

При ядерных взрывах ошибка оценки доли сейсмической энергии при различных методах расчета по объемным и по поверхностным волнам, по данным Пасечника [11]

достигает 1000 раз. Такая ошибка выявляет недостатки методики расчетов сейсмической энергии.

Поэтому предлагается кинетическую энергию колебательного процесса (сейсмических волн) от импульсного источника в упругой среде определять по максимальной амплитуде в первых вступлениях волн по формулам (4-6).

Но кроме слабых землетрясений, имеющих, как правило, один источник излучения (один срыв вдоль площади скольжения) существуют еще и сильные землетрясения, имеющие более сложный, мультиплетный источник излучения [3] сейсмических волн, в результате неравномерного развития разрыва. При каждом ускорении и остановке разрыва должна выделяться сейсмическая энергия [6]. В этом случае, по-видимому, необходимо установить количество излучателей и рассчитать сейсмическую энергию каждого излучателя, но не суммировать энергию всех колебаний.

Связь сейсмической энергии землетрясений с их магнитудой

Из равенства (4) можно легко установить связь магнитуды $M = M(A/T)$ с сейсмической энергией E землетрясения, если полагать, что магнитуда пропорциональна десятичному логарифму энергии. Будем, как и ранее, полагать, что в S-волнах заключена бóльшая часть сейсмической энергии землетрясения.

Соотношение, связывающее энергию землетрясений с их магнитудой:

$$M = a * K_s - b, \text{ где } K_s = \lg E.$$

Подставим в соотношение $K_s = \lg E$ значение сейсмической энергии E из (5):

$$K_s = \lg \left[C * \left(\frac{A}{T} \right)_{\max}^2 * \frac{T}{2} \right], \quad (8)$$

и, учитывая, что $M \left(\frac{A}{T} \right) = \lg \left(\frac{A}{T} \right)_{\max}$, где A измеряется в мкм, получим, что:

$$a = 0,5 \text{ и } b = -0,5 \lg C_1, \text{ где } C_1 = C * \frac{T}{2}.$$

В итоге связь магнитуды $M = M(A/T)$ с сейсмической энергией E землетрясения выглядит следующим образом:

$$M_s \left(\frac{A}{T} \right) = 0,5 * K_s - 0,5 \lg C_1, \text{ или } K_s = 2 M_s \left(\frac{A}{T} \right) + \lg C_1;$$

Выводы

1. Проведенный анализ формул, используемых для расчетов сейсмической энергии землетрясений и взрывов, показал, что они не соответствуют физическим условиям, принятым при постановке задачи.
2. Сейсмическая энергия, рассчитанная по используемым формулам, завышена 1-2 порядка.
3. Предлагается в формулах для расчетов сейсмической энергии вместо сомножителя под знаком Σ использовать сомножитель $(A/T)_{\max}^2$ и энергию определять за полупериод максимального колебания по формулам (5) и (6).

Автор благодарен академику. РАН Гордееву Е.И. за внимание к работе, к.г.-м.н. Аносову Г.И., д.ф.-м.н. Гусеву А.А. и к.ф.-м.н. Широкову В.А. за полезные замечания и к.ф.-м.н. Чубаровой О.С. за помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белотелов В.Л., Кондорская Н.В. К вопросу о вычислении энергии землетрясений // Изв. АН СССР, сер. геофиз. № 12. 1960. С. 1744-1755.
2. Буллен К.Е. Введение в теоретическую сейсмологию. М.: Мир, 1966. С. 460.
3. Виноградов С.Д., Кузнецова К.И., Москвина А.Г. и др. Физическая природа разрыва и излучение сейсмических волн.// В кн.: Физические процессы в очагах землетрясений, М.: Наука, 1980. С. 129-140.
4. Голицын Б.Б. О землетрясении 18 февраля 1911 года// Избр. тр., т. II, Изд-во АН СССР, 1960. С.
5. Касахара К. Механика землетрясений// М.: Мир, 1985. С. 460.
6. Коган С.Я. Сейсмическая энергия и методы ее определения М.: Наука, 1975. С. 152.
7. Коган С.Я., Об определении энергии сейсмических волн произвольной формы // Изв. АН СССР, сер. геофиз. № 5. 1960. С. 644-652.
8. Кондорская Н.В., Соловьев С.Л. Общее состояние вопроса определения магнитуды и энергетической классификации землетрясений в практике сейсмических наблюдений, в кн.: Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М. 1974. С. 13-42.
9. Мячкин В.И., Костров Б.В., Соболев Г.А. и др. Основы физики очага и предвестники землетрясений // В кн. Физика очага землетрясений. М. Наука, 1975. С. 6-29.
10. Нурмагамбедов А. Затухание сейсмических волн и энергетическая классификация землетрясений по наблюдениям аппаратурой ЧИСС, в кн.: Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М. 1974. С. 164-173.
11. Пасечник И.П. Характеристика сейсмических волн при ядерных взрывах и землетрясениях М.: Наука, 1970. С. 191.
12. Ризниченко Ю.В. Проблема величины землетрясения, в кн.: Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений, М. 1974. С. 43-78.
13. Саваренский Е.Ф., Курнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии// М.: Гостехиздат, 1955. С. 544.
14. Федотов С.А. О поглощении поперечных сейсмических волн в верхней мантии и энергетической классификации близких землетрясений с промежуточной глубиной очага Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 6. 1963. С. 820-849.
15. Wiechert E., Zoppritz K., Geiger L., Guttenberg B., Uber Erdbebenwellen Nachr. K. Asses. Wiss. Göttingen, Mathem.- Phys., Kl., 1907-1912.

NOTES ON THE METHOD FOR CALCULATION OF SEISMIC ENERGY OF ARTIFICIAL EXPLOSIONS AND EARTHQUAKES

A.V. Storcheus

*Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006
e-mail: sav@kscnet.ru*

At present the formulas used for calculations of seismic energy of earthquakes and artificial explosions don't correspond with the physical conditions accepted at a conclusion of these formulas. The seismic energy calculated by using these formulas is overestimated 1-2 orders. Methods of calculation of the seismic energy and energy-magnitude-relationships are proposed.