

А. А. ГУСЕВ

ОПИСАТЕЛЬНАЯ СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОРОТКОПЕРИОДНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

(Представлено академиком М. А. Садовским 21 IX 1978)

В работе предпринята попытка описать процесс возбуждения короткопериодного (к.п.) излучения очага землетрясения, допуская существование внутри этого очага множества некогерентно излучающих очагов субземлетрясений меньшего размера. Эти субочаги размещаются в пределах площадки основного разрыва и включаются в период его развития. При этом число и распределение их по размерам определяют уровень и форму спектра землетрясения в его высокочастотной (к.п.) области, в то время как в области корнер-частоты спектр определяется в основном величиной сейсмического момента M_0 и характерного времени T_x развития основного очага.

Предлагаемая статистическая модель излучения очага является развитием известных моделей (¹⁻⁴). Используя подход (^{3, 4}), мы будем подразумевать под субочагом некоторый отдельный этап или элемент развития «шероховатой» трещины, имеющий определенный размер (ранг). Субочаги могут порождаться: а) ветвлением трещины («опережающий разрыв») (³); б) локальным временным зацеплением берегов трещины или неоднородным трением между ними; в) взаимным проскальзыванием без трения прижатых друг к другу гладких неплоских поверхностей («стиральная доска») (⁴). По характеру подвижки субочаги а) и б) сдвиговые, а в) — в основном отрывный. Возможны и иные типы. Субочаги разных рангов и типов могут совмещаться (налагаться) в пространстве и времени.

Введение именно статистической модели очага позволяет разрешить ряд парадоксов, возникающих при попытке применить к очагам землетрясений теорию подобия. Такая попытка, как мы увидим, имеет определенные оправдания. На рис. 1 приведены осредненные зависимости характеристик очагов мелкофокусных землетрясений от величины их сейсмического момента M_0 . Сначала по литературным данным были построены зависимости для магнитуд M_S и M_{LH} (а) и M_L (б). Затем, также на основе осреднения данных различных литературных источников, были построены кривые для средней подвижки B (в) (по полевым наблюдениям), размера очага L (г) (в основном по афтершоковым наблюдениям), характерного времени T_x (д) (в основном по спектрам) и излученной (сейсмической) энергии E (е). На кривых указаны границы разброса основной части данных. Если литературные данные были функциями от M , они преобразовывались в функции от M_0 с помощью кривых а и б.

Из рис. 1, в—е, видно, что простейшее следствие предположения о подобии, согласно которому $B \sim L \sim T_x \sim E^{1/3} \sim M_0^{1/3}$, нарушено при $\lg M_0 < 25$. При $\lg M_0 \geq 25$ это следствие в среднем выполнено (сброшенное напря-

жение постоянно), что естественно наводит на мысль о приблизительном подобии очагов в этой области значений M_0 . Однако, как легко показать, при подобии в рамках любой детерминированной модели источника в его ближней зоне максимальное ускорение обратно пропорционально L , а в дальней зоне слабо зависит от L , что грубо расходится с наблюдениями. Далее, попытки построения реалистических детерминированных моделей источника (например, (5)) приводят к появлению амплитудных спектров с убыванием по ω^{-3} или быстрее на высоких частотах, что также не соответствует наблюдениям. Статистическая модель лишена подобных противоречий.

Дедуктивный путь построения такой модели требовал бы: а) наличия корректных механических моделей «основного» очага и «типичных» суб-

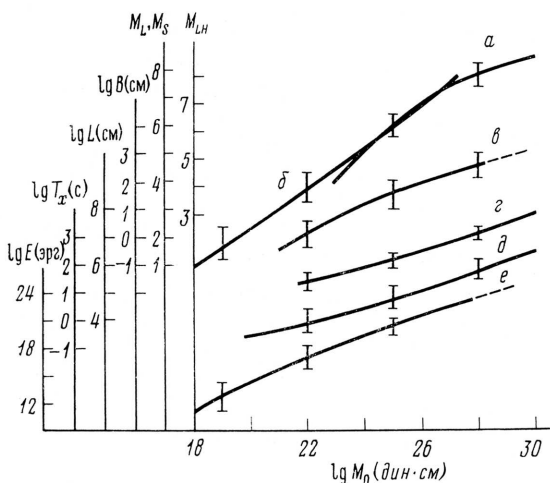


Рис. 1

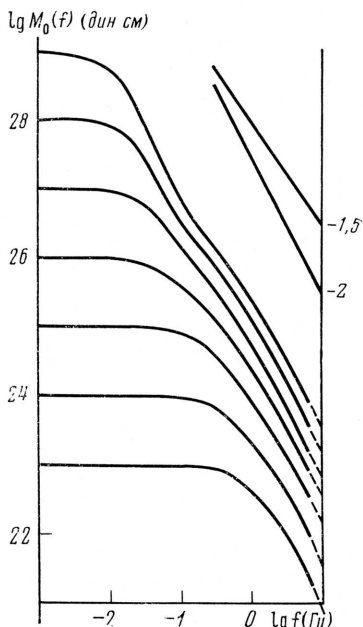


Рис. 2

Рис. 1. Характеристики очагов мелкофокусных землетрясений. а — M_{LH} и M_S , б — M_L , в — B , г — L , д — T_x , е — E

Рис. 2. Осредненные спектры сейсмического момента $M_0(f)$ для целых значений $\lg M_0 = \lg M_0(0)$

источников и их излучения; б) построения на основе некоторых правдоподобных гипотез о механизме трещинообразования оценок для плотностей распределения субисточников по размерам, моментам, ориентировкам и типам, с одной стороны, и по площади основного разрыва и периоду времени его работы, с другой; в) расчета по данным а) и б) характеристик суммарного излучения. Такая программа в настоящее время нереализуема. В данной работе мы попытаемся при простейших допущениях развить описательный («феноменологический») подход, не задавая плотность субисточников, а оценивая мощность некогерентного излучения по наблюдениям. Родственный подход предлагался в (6, 7).

Допустим, что очаг землетрясения можно рассматривать как наложение «гладких» (со спектром типа ω^{-3}) однотипных, подобных друг другу

и включающихся в случайные моменты времени субочагов, распределенных приблизительно равномерно в пределах площади разрыва. Распределение моментов включения субочагов во времени в период развития основного очага также приблизительно равномерно. Распределение субочагов по размерам в первом приближении, согласно предположению Шебалина ⁽³⁾, можно считать степенным ($N(L) \sim L^{-k}$). Можно показать, что в этом случае при $k=2,5$ получается правдоподобный суммарный спектр типа $\omega^{-1,7}$. Однако это приближение слишком грубо. Оно, в частности, не соответствует фактически наблюдаемым спектрам землетрясений с $\lg M_0 \geq 27$ ($M \geq 7,5$), которые обычно кроме основной корнер-частоты имеют характерное «колено» на частотах $\sim 0,2$ Гц, что указывает, по-видимому, на наличие некоторого преобладающего размера субочагов. Таким образом, нет оснований ожидать простого вида распределения субочагов по размерам и оценки спектров приходится получать непосредственно из эмпирического материала.

Для определения характеристик к.п. излучения от мелкофокусных землетрясений были построены по литературным данным осредненные спектры $M_0(f)$ объемных волн землетрясений в единицах сейсмического момента (рис. 2). (Иначе говоря, сглаженные спектры момента эквивалентных точечных источников.) Для этого были использованы спектры ускорений ⁽⁸⁾, ЧИСС-спектры ⁽⁹⁾, магнитудные кривые и другие данные. Для пересчета магнитуд и ЧИСС-спектров в спектральные плотности использовалось предположение, что сейсмограмма есть отрезок гауссова стационарного случайного процесса. Точность полученных средних $0,2-0,3$ десятичного порядка, величина разброса наблюдаемых спектров в основном в пределах $\pm 0,5$ порядка.

Таким образом, амплитуды к.п. излучения при заданном M_0 сильно изменяются. Для выявления причин этого было проведено исследование соотношения $m_b - M_s$ по каталогу механизмов ⁽¹⁰⁾. Считая m_b характеристикой интенсивности к.п. излучения, можно сделать вывод, что эта интенсивность максимальна для взбросов и минимальна для сдвигов, т. е. часть вариаций связана с «механизмом очага», другие можно связать с вариациями сброшенного напряжения $\Delta\sigma$.

Предположение об однородности субисточников позволило нам при построении рис. 2 условно принять, что формы спектров P - и S -волн близки друг к другу. Однако, строго говоря, спектр P -волн спадает с ростом частоты заметно медленнее, чем спектр S -волн. Впервые на это указал Бландфорд ⁽⁴⁾, который и ввел гипотезу об отрывных субисточниках для объяснения этого расхождения (отрывные источники излучают P -волны интенсивнее, чем сдвиговые). Таким образом, спектры рис. 2 следует рассматривать лишь как грубое приближение.

Следуя логике ⁽¹¹⁾, спектры рис. 2 были пересчитаны в энергетические спектры, отнесенные к единице времени t и площади S разрыва. Пусть $E(f)$ есть энергия S -излучения в функции частоты, тогда нормированный спектр

$$W(f) = \frac{\partial^3 E(f)}{\partial \lg f \partial S \partial t}$$

может быть при некоторых упрощающих предположениях записан для прямоугольного разрыва в виде

$$W(f) = \frac{2\pi \ln 10 v w \Delta \varepsilon f^3 M_0^2(f)}{5 V_s^2 M_0} ; \quad (1)$$

здесь V_s — скорость S -волн, f — частота, $M_0(f)$ — спектр момента (см. рис. 2), $M_0 = M_0(0)$, а v , w и $\Delta\epsilon$ — следующие безразмерные характеристики источника (в скобках указано принятое значение): $v = V_{\text{разр}}/V_s$ — число Маха для вспарывания (0,6), где $V_{\text{разр}}$ — скорость вспарывания разрыва и $V_s = 2,5$ км/с; $w = W/L$ — коэффициент вытянутости (0,5), где W — ширина разрыва; $\Delta\epsilon = B/W$ — сброшенная деформация ($1 \cdot 10^{-4}$). При выводе формулы (1) и связанных с ней расчетах мы пренебрегли коэффициентами ~ 1 .

Оценивая теперь средний поток энергии к.п. излучения с поверхности очага, определяемый как

$$W_0 = \int_{-0,5}^{\infty} W(f) d \lg f,$$

получим (см. рис. 2) $W_0 \approx 5 \cdot 10^7$ эрг/см²·с для всех значений $\lg M_0$ от 25 до 28 ($M = 5-7,8$). Вне этого интервала W_0 несколько снижается. Из-за вариаций интенсивности к.п. излучения точность оценки W_0 мала ($\pm 0,5$ порядка), но на основной вывод — о слабой зависимости W_0 от размера источника — это не влияет.

Смысл этого результата становится ясным, если заметить, что W_0 — по существу плотность мощности потерь на радиационное трение при проскальзывании берегов трещины (¹²). Принимая для оценочных целей сброшенную упругую энергию $E_{\text{упр}} = \frac{1}{2} \Delta\epsilon M_0$, получаем, что ее условная плотность мощности $\sim 5 \cdot 10^8$ эрг/см²·с. Таким образом, среднее значение «к.п. сейсмического к.п.д.» получается $\sim 10\%$ с вариациями на полпорядка в обе стороны, что следует считать весьма правдоподобным.

Заметим, что постоянство W_0 согласуется с гипотезой приблизительного подобия и в некотором смысле завершает ее. Более того, на основании данных о к.п. излучении можно предполагать даже приблизительную автоматодельность развития разрыва до начала его торможения. Мощность к.п. излучения $E(t)$ должна в этом случае расти со временем t от начала разрыва как $E(t) = \text{const} \cdot t^2$ независимо от окончательного значения L , S , M_0 или M . Примерно такой результат ($E(t) \approx \text{const} \cdot t^{1,7}$) получен в (⁷) по телесеismicким к.п. записям.

Выводы из предлагаемой модели к.п. излучения проверим по наблюдениям в ближней зоне. Во-первых, оценивая по W_0 пиковое ускорение \hat{a}_0 в окрестности разрыва, получим $\hat{a}_0 = 200-500$ гал. Близкие оценки (равно как и вывод о независимости \hat{a}_0 от M) получены в (¹³) на материале наблюдений. Во-вторых, найдем зависимость \hat{a} от расстояния r , для этого воспользуемся светотехнической аналогией с диффузным излучателем постоянной яркости. Для некогерентно излучающего диска радиуса R амплитуда излучения на его оси на расстоянии r $a(r) = a_0 (1 + (r/R)^2)^{-1/2}$, где a_0 — амплитуда у поверхности. Полагая здесь $a_0 = \hat{a}_0 = \hat{a}_0(W_0)$, $R = \frac{1}{2} \sqrt{LW}$, где $L = L(M_0)$, $W = wL$ и $M_0 = M_0(M)$, и учитывая поглощение и несферическое расхождение, обнаружим хорошее согласие с наблюдениями в ближней зоне (см., например, (¹⁴)). Наконец, на основании зависимостей $M(M_0)$, $L(M_0)$, $T_x(M_0)$ и $\hat{a}(r/R)$ была получена «теоретическая» зависимость балльности I от M и r . Вводилось поглощение ($Q = 300$, $f = 2,5$ Гц). Было принято, что $I(\hat{a}, T_x) = 3,3 \lg \hat{a} + 0,9 \lg T_x + C$. Подбором константы C полученное семейство кривых может быть совмещено с эмпирической зависимостью $I(M, r) = 1,5 M - 3,5 \lg r + 3,1$ (¹⁵) со средней

точностью 0,15 балла в интервале $M=5-8$, $r=10-100$ км. Таким образом, наша простая модель хорошо описывает эмпирические данные о к.п. излучении в ближней зоне.

Институт вулканологии
Дальневосточного научного центра
Академии наук СССР
Петропавловск-Камчатский

Поступило
29 IX 1978

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ N. Haskell, Bull. Seismol. Soc. Am., v. 56, 125 (1966). ² K. Aki, J. Geophys. Res., v. 72, 1217 (1967). ³ Н. В. Шебалин, В сб.: Вопр. инж. сейсмологии, в. 14, М., «Наука», 1971, стр. 50. ⁴ R. R. Blandford, Bull. Seismol. Soc. Am., v. 65, 1385 (1975). ⁵ F. A. Dahlen, Bull. Seismol. Soc. Am., v. 64, 1159 (1974). ⁶ Т. Г. Раутиан, В сб.: Вопр. инж. сейсмологии, в. 18, М., «Наука», 1976, стр. 3. ⁷ Ю. Ф. Копничев, Г. Л. Шпилькер, ДАН, т. 239, № 2, 293 (1978). ⁸ M. D. Trifunac, Bull. Seismol. Soc. Am., v. 66, 1351 (1976). ⁹ В. И. Халтурин и др., В сб.: Вопросы количественной оценки сейсмической опасности, М., «Наука», 1975, стр. 123. ¹⁰ D. Denham, Summary of Earthquake Focal Mechanisms for the W. Pacific, Boulder, WDC-A-NOAA, 1977. ¹¹ Ю. В. Ризниченко, С. С. Сейдузова, Изв. АН СССР, Физика Земли, № 11, 3 (1972). ¹² Б. В. Костров, Механика очага тектонического землетрясения, М., «Наука», 1975. ¹³ П. И. Крамынин, В. В. Штейнберг, В сб.: Вопр. инж. сейсмологии, в. 18, М., «Наука», 1976, стр. 23. ¹⁴ R. A. Page et al., Geol. Surv. Prof. Paper, № 944-A, Washington, U. S. Govt. Print. Off., 1975, p. 31. ¹⁵ Н. В. Шебалин, В сб.: Сейсмическое районирование СССР, М., «Наука», 1968, стр. 95.