

УДК 550.31

О ВОЗМОЖНОЙ МОДЕЛИ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ С ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИМИ СТОРОНАМИ

В.И. Осауленко

Объединенный институт физики Земли Российской академии наук, Москва

Предложена качественная модель очага землетрясения со взаимодействующими поверхностями разрыва. На основе этой модели дано возможное объяснение природы короткопериодного некогерентного излучения. В рамках существующих моделей такое излучение не проявляется.

THE MODEL OF THE SEISMIC SOURCE WITH INTERACTIVE OPPOSITE SIDES

V.I. Osaulenko

United Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Science, Moscow

The qualitative model of a seismic source with interacting surfaces of break is offered. On the basis of this model the possible explanation of a nature shortperiod and not coherent seismic radiation is given. Within the framework of existing models such radiation is not shown.

Введение

В сложившейся к настоящему времени формальной теории очага землетрясения достигнуты определенные успехи, позволяющие изучать и классифицировать основные параметры наблюдаемых событий. Достаточно указать на тот факт, что считавшаяся двадцать лет назад гипотетической такая характеристика очага, как тензор его сейсмического момента, сейчас определяется из сейсмических наблюдений и является стандартным параметром. Тем не менее, до настоящего

времени остаются открытыми некоторые существенные вопросы механики очага землетрясения, которые не нашли своего ответа в формальной теории очага [1–5].

В модельных задачах теории очага землетрясения описание поведения материала Земли, как на разрыве, так и вне его, основывается на использовании модели линейно-упругого тела вместе с принятыми в ней ограничениями. Реальный разрыв сплошности представляется как некоторая двухсторонняя поверхность с замкнутым контуром. Относительно этой поверхности формулируются соответствующие условия сопряжения, которые, собственно, и определяют постановку соответствующих граничных задач теории очага [3].

В теории очага происходящего землетрясения рассматриваются два способа описания события: кинематический (дислокационный) и динамический. При кинематическом подходе задается скачок вектора перемещений на поверхности разрыва. При динамическом же подходе на поверхности разрыва соответствующим образом задаются силовые локально уравновешенные нагрузки, а скачок вектора перемещений на поверхности разрыва определяется в результате решения смешанной динамической граничной задачи линейной теории упругости. В обоих случаях волновое поле возмущения вне разрыва может быть определено в рамках соответствующего метода [3, 4].

Разрыв сплошности, рассматриваемый в теории очага землетрясения, можно определить как "гладкий". Вклад такого разрыва в изменение состояния среды определяется только поведением скачка вектора перемещений на поверхности разрыва. Скачок напряжений на таком разрыве равен нулю, что является следствием условия локальной уравновешенности граничных нагрузок на поверхности разрыва, принятого в теории очага. В рамках модели "гладкого" разрыва сразу встает вопрос о том, что нужно понимать под проявлением эффекта взаимодействия противоположных сторон разрыва. Эта проблема, трактуемая соответствующим образом в эксперименте [6, 7], в теории очага не обсуждается.

Указанные обстоятельства заставляют внимательно проанализировать те модельные представления, которые легли в основу современной теории очага. Целью настоящей статьи является попытка выйти за рамки традиционных представлений теории очага и обсудить на этой основе возможность формулировки модели очага землетрясения с взаимодействующими сторонами. Развиваемые представления могут оказаться существенными как для более полного понимания механики процесса землетрясения, так и для получения новой информации из сейсмологических наблюдений.

1. Модель разрыва с взаимодействующими сторонами

Сформулируем возможный подход к построению модели очага землетрясения с взаимодействующими противоположными сторонами поверхности разрыва.

Рассмотрим трехмерную область упругой среды, один из размеров которой много меньше двух других. В частности, эту область можно уподобить тектоническому разлому с частично нарушенной сплошностью (глинкой трения). Известно, что противоположные поверхности реального разлома имеют ярко выраженную структурную шероховатость в виде выступов и т.п.

Пусть очаг землетрясения реализуется в виде указанной трехмерной области, что может сопровождаться дополнительным нарушением ее сплошности. В этом случае не совмещающиеся одна с другой поверхности разлома приходят в относительное движение. При этом не исключено, что выступы на сторонах разлома могут взаимодействовать друг с другом либо непосредственно (зацепление), либо через глинку трения. Так как указанное взаимодействие реализуется в трехмерной области, то такой процесс вспарывания очага назовем объемным нарушением сплошности.

Попытки формального, сколько-нибудь строгого, описания развития разрыва с взаимодействующими сторонами приводят к геометрически и физически нелинейной граничной задаче теории упругости. Очевидно, что решить такую задачу не представляется возможным. Поэтому сформулируем модель, которая в рамках линейной теории упругости позволит качественно учесть взаимодействие противоположных сторон развивающегося разрыва.

Формально, это может быть реализовано в рамках модели плоского разрыва, на поверхности которого, в определенном смысле, не соблюдаются условия локальной силовой уравновешенности. При этом необходимо, из общих соображений, потребовать выполнения соответствующих условий интегральной силовой уравновешенности.

Рассмотрим трехмерное безграничное линейно-упругое однородное изотропное пространство, которое содержит плоский разрыв сплошности. На противоположных сторонах поверхности этого разрыва задана некоторая сдвиговая нагрузка. Эту нагрузку можно представить в виде суммы ее симметричной и антисимметричной относительно плоскости разрыва частей.

Антисимметричная, локально уравновешенная составляющая нагрузки определяет поведение скачка перемещений на разрыве. Это обстоятельство определяет только те эффекты, которые свойственны модели очага землетрясения как "гладкого" разрыва сплошности. Наличие сим-

метричной составляющей нагрузки приводит к необходимости рассмотрения граничной задачи о скачке касательных к разрыву напряжений на тех участках разрыва, где не выполняются условия локальной уравновешенности.

2. Пример модельной задачи

Рассмотрим один из возможных вариантов модельной граничной задачи механики очага, который соответствует изложенным выше качественным представлениям.

В безграничном линейно-упругом однородном изотропном пространстве введем декартову систему координат (X, Y, Z) . Пусть в плоскости $Z = 0$ при нулевых начальных условиях распространяется сдвиговый разрыв сплошности с двухсторонней поверхностью $S(X, Y \pm 0, t)$. Пусть в некоторый момент времени t_0 на элементарных площадках поверхностей разрыва $\Delta S^\pm (0 \leq r \leq r_0, z = \pm 0, 0 \leq |\varphi| < \pi)$ начинают действовать следующие импульсные касательные нагрузки:

$$\tau_x^\pm = -\tau_x^0 H(\pm \cos \varphi) \delta(t - t_0). \quad (1)$$

Здесь (r, φ, z) – местные цилиндрические координаты, такие, что $x = r \cos \varphi$, $y = r \sin \varphi$, $x = X - X_0$, $y = Y - Y_0$, $z = Z$; $H(\cdot)$ – функция Хевисайда; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция, а τ_x^0 – некоторая константа, характеризующая среднюю интенсивность нагрузки.

Очевидно, что приведенные силовые условия (1), вообще говоря, не удовлетворяют условию локальной уравновешенности. Антисимметричная часть указанной нагрузки (1) с интенсивностью $-1/2 \tau_x^0$ является локально уравновешенной. Эта часть нагрузки определяет скачок сдвиговых перемещений на разрыве.

Пусть выполняется условие безотрывного движения на поверхности разрыва. При этом симметричная часть нагрузки (1) с интенсивностью $\pm 1/2 \tau_x^0 \operatorname{sgn} \cos \varphi$ ($\operatorname{sgn}(\cdot)$ есть знаковая функция) приводит к необходимости рассмотрения дополнительной граничной задачи. Это есть задача определения динамических возмущений, которые вызваны во всюду сплошной среде заданным на соответствующей площадке интегрально-уравновешенным скачком касательных напряжений

$$[\tau_x] = \tau_x^+ - \tau_x^- = \tau_x^0 \operatorname{sgn} \cos \varphi. \quad (2)$$

Скачок напряжений (2) реализуется как результат условий сопряжения соответствующих величин на противоположных поверхностях разлома, который заполнен глиной трения.

Можно показать [8], что смещения в волновой зоне такого источника возмущений можно представить в виде:

$$\begin{aligned}
U_R^P &= \frac{V_S^2}{V_P^2} \frac{\tau_x^0}{4\pi\mu} \frac{\sin\theta \cos\varphi}{R} \cdot I^P, \\
U_\theta^S &= \frac{\tau_x^0}{4\pi\mu} \frac{\cos\theta \cos\varphi}{R} \cdot I^S, \\
U_\varphi^S &= \frac{\tau_x^0}{4\pi\mu} \frac{\sin\varphi}{R} \cdot I^S,
\end{aligned} \tag{3}$$

где (R, θ, φ) – местные сферические координаты точки наблюдения в дальней зоне субисточника, $\tau = t - t_0 - \frac{R}{v_{P,S}}$ – текущее время в точке наблюдения V_P - и V_S -волн, μ – модуль сдвига среды.

В правых частях формул (3) соответствующие множители перед $I^{P,S}$ в совокупности определяют диаграмму направленности излучения от безмоментного силового диполя. Каждая из величин I^P, I^S определяет вклад эффекта протяженности субисточника в дальней волновое поле. Эти величины имеют вид:

$$\begin{aligned}
I^{P,S} &= -\frac{V_{P,S}^2}{\sin^2\theta} \operatorname{sgn}\tau \left\{ H\left(\frac{r_0^2}{V_{P,S}^2} \sin^2\theta \sin^2\varphi - \tau^2\right) |\tau| (|\operatorname{ctg}\varphi| - |\operatorname{tg}\varphi|) + \right. \\
&+ H\left(\tau^2 - \frac{r_0^2}{V_{P,S}^2} \sin^2\theta \sin^2\varphi\right) H\left(\frac{r_0^2}{V_{P,S}^2} \sin^2\theta \cos^2\varphi - \tau^2\right) \times \\
&\times \left(\sqrt{\frac{r_0^2 \sin^2\theta}{V_{P,S}^2} - \tau^2} - |\tau \operatorname{tg}\varphi|\right) + \\
&\left. + H\left(\tau^2 - \frac{r_0^2}{V_{P,S}^2} \sin^2\theta \cos^2\varphi\right) \sqrt{\frac{r_0^2 \sin^2\theta}{V_{P,S}^2} - \tau^2} \right\}. \tag{4}
\end{aligned}$$

Из представлений (4) для I^P и I^S следует, что субисточник рассмотренного типа порождает в дальней зоне дипольный уравновешенный импульс смещений в V_P - и V_S -волнах. Следовательно, наличие такого субисточника на разломе не вносит вклада в величину длинноволнового сейсмического момента. Можно ожидать, что именно с действием такого субисточника связано качественно правдоподобное объяснение природы происхождения короткопериодного очагового излучения. Совокупность подобного рода субисточников обладает свойством взаимной некогерентности.

3. Обсуждение результатов

В теории очага происходящего тектонического землетрясения ставится и решается смешанная граничная задача линейной теории упругости для плоского разрыва. Основным ограничением линейной теории

упругости является неразличимость пространственных и материальных координат частиц, которые лежат на противоположных сторонах поверхности разрыва. В рамках этого ограничения локальные условия попарной силовой уравновешенности с необходимостью приписываются тем точкам поверхности разрыва, относительно которых определен текущий скачок вектора перемещений [4].

Это значит, что процесс развития разрыва реализуется одним из двух возможных способов. В одном из них противоположные стороны разрыва не взаимодействуют, в другом же взаимодействие может иметь место, но соответствующее возможное изменение граничных силовых условий не нарушает их локальной уравновешенности. Такие идеализированные модели представляют собой макроописание реального разрыва, которое оправдано с позиций практики анализа сейсмических волн вдали от разрыва.

Рассмотрим текущее состояние среды вне распространяющегося разрыва сплошности. Будем считать "гладким" такой разрыв, вклад которого в изменение состояния среды определяется только скачком перемещения на поверхности разрыва. Так как скачок напряжений на таком разрыве равен нулю, то автоматически выполняются условия локальной уравновешенности.

Опыт решения смешанных граничных задач динамической теории упругости для плоских моделей "гладких" разрывов показывает, что в рамках этих моделей вряд ли возможно выявить и качественно описать ряд эффектов, которые сопровождают процесс развития очага землетрясения. Прежде всего, это касается проблем формирования короткопериодного некогерентного сейсмического излучения из очага землетрясения, а также эффектов прерывистого развития (скольжения) в очаге землетрясения [6].

Принято считать, что в моделях "гладких" разрывов высокочастотное излучение обусловлено только характером развития контура разрыва. Такие модели рассмотрены как для односвязных, так и для различных модификаций многосвязных [9] поверхностей разрыва. В последнем случае сохранение отдельных участков сплошности при вспарывании среды приводит к увеличению роли средних и высоких частот спектра сейсмического колебания и к снижению величины длинноволнового сейсмического момента. Следует заметить: согласно принятому выше определению, рассмотренная в работе [10] специфическая модель сейсмического субисточника, вообще говоря, не является "гладкой".

Анализ приведенных выше формул показывает, что скачки касательных напряжений, которые могут возникать на отдельных площадках сдвигового разрыва, вносят новое качество в характер волнового поля.

Это качество не присуще традиционным ("гладким") моделям очага тектонического землетрясения.

Указанное новое качество может быть обусловлено взаимодействием противоположных сторон поверхности разрыва при их взаимном движении. Возникающие при этом субисточники на разломе не вносят вклада в величину длинноволнового сейсмического момента, но порождают короткопериодное некогерентное излучение. Это обстоятельство не проявляется ни в кинематическом, ни в динамическом варианте модели очага землетрясения.

Существенно, что имеет место и различие в угловой направленности сейсмического излучения, которое порождено "гладким" разрывом и субисточником рассмотренного типа. Преимущественная направленность излученных таким субисточником V_P -волн приурочена к плоскости разрыва. Это обстоятельство может быть полезным при разработке методики однозначного выделения плоскости разрыва из нодалных плоскостей очага землетрясения.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Взаимодействие противоположных сторон поверхности разрыва при их взаимном движении не вносит вклада в величину длинноволнового сейсмического момента, но порождает короткопериодное некогерентное излучение. Это обстоятельство не проявляется ни в кинематической, ни в динамической традиционных моделях очага землетрясения.

2. Имеет место различие в угловой направленности сейсмического излучения, которое порождено "гладким" разрывом и субисточником рассмотренного типа. Преимущественная направленность излучаемых таким субисточником V_P -волн приурочена к плоскости разрыва и направлению субподвижки.

Изложенные в статье результаты носят сугубо качественный характер и требуют как дальнейшего теоретического осмысления, так и сопоставления с результатами сейсмологических наблюдений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейлис-Борок В.И. К вопросу о связи точечных и объемных источников // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1956. N 4. С.404–409.
2. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
3. Костров Б.В. Теория очагов тектонических землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1970. N 4. С.84–101.

4. *Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.
5. *Аки К., Ричардс П.* Количественная сейсмология. М.: Мир, 1983. Т.1,2. 880 с.
6. *Byerlee J.D.* The mechanism of stick-slip // *Tectonophysics*. 1976. N 9. P.475–486.
7. *Byerlee J., Myachkin V., Summers R., Voevoda O.* Structure developed in a fault during stable sliding and stick-slip // *Tectonophysics*. 1978. N 4. P.161–171.
8. *Костров Б.В., Осауленко В.И.* Движение жесткого массивного диска в безграничной среде под действием сейсмических волн // *Изв. АН СССР. Физика Земли*. 1971. N 9. С.34–48.
9. *Kostrov B.V., Das S.* Principles of earthquake source mechanics. Cambridge University Press, 1988. 286 p.
10. *Das S., Kostrov B.V.* Breaking of a single asperity: Rupture process and seismic radiation // *J. Geophys. Res.* 1983. Vol. 88. P.4277–4288.