

МОДЕЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА*

А. В. ВИКУЛИН

Геофизическая служба РАН

Петропавловск-Камчатский, Россия

А. Г. ИВАНЧИН

Институт физики прочности и материаловедения РАН

Томск, Россия

Работа посвящена развитию ротационной модели очага тектонического сильнейшего землетрясения, предложенной авторами ранее. Для взаимодействующих очагов-блоков, слагающих сейсмофокальную зону окраины Тихого океана, выводится уравнение движения Синус—Гордона и показывается, что его решения могут быть использованы для объяснения некоторых свойств сейсмического процесса.

1. Введение

Ранее нами была предложена ротационная модель, в основе которой заложены представления о вращающемся очаге сильнейшего землетрясения — сейсмофокальном блоке [1, 2]. В условиях вращающейся Земли такой поворот в силу закона сохранения момента блока должен сопровождаться образованием поля упругих напряжений вокруг очага готовящегося землетрясения. Эти поля напряжений, как показано в [3], взаимодействуют друг с другом.

Таким образом, мы приходим к выводу, что тихоокеанская сейсмофокальная зона представляет собой цепочку взаимодействующих блоков, каждому из которых можно поставить в соответствие момент силы (диполь). В такого рода системах, как известно, могут распространяться волны различной природы, в том числе и нелинейные.

Целью настоящей работы является дальнейшее развитие ротационной модели очага сильнейшего землетрясения в масштабе всей сейсмофокальной зоны, протягивающейся вдоль окраины Тихого океана.

2. Постановка задачи

Рассмотрим цепочку взаимодействующих сейсмофокальных очагов-блоков сильнейших землетрясений. Такую цепочку будем считать одномерной, что в случае Тихоокеанской

*© А. В. Викулин, А. Г. Иванчин, 1997.

сейсмофокальной зоны представляется достаточно обоснованным. Положим, что очаги-блоки имеют примерно одинаковые линейные размеры и геометрическую форму. Каждый очаг-блок будем характеризовать моментом инерции I и объемом V . Тогда уравнение движения для очага-блока, который повернулся на угол β , можно записать в виде

$$I \cdot \ddot{\beta} = K_1 + K_2.$$

Здесь K_1 — есть момент силы, соответствующий полю упругих напряжений, которое вследствие вращения Земли появляется в окружающем очаг-блок пространстве. Как показано в [3], этот момент можно записать в виде

$$K_1 = -6\pi^2\omega(3V/4\pi)^{4/3}(\rho G/15)^{1/2}\sin(\beta/2),$$

где $\omega = 7,29 \cdot 10^{-5}$ рад/с — скорость вращения Земли вокруг своей оси, G — модуль сдвига и ρ — плотность верхних слоев Земли. Знак минус означает, что момент направлен таким образом, чтобы уменьшить величину угла поворота блока. K_2 — есть момент силы, отвечающей за взаимодействие рассматриваемого очага с остальными очагами цепочки. Из самых общих соображений, основанных на моментной теории упругости, ясно, что величина такого момента силы должна быть пропорциональна как упругой энергии очага землетрясения, равной $V \cdot \partial^2\beta/\partial z^2$, так и упругой энергии, соответствующей всем остальным очагам-блокам цепочки. В качестве последней выбираем величину, равную средней линейной плотности упругой энергии цепочки очагов W . Таким образом, момент силы, отвечающей за взаимодействие рассматриваемого очага с другими очагами цепочки, можно записать в виде

$$K_2 = \varkappa WV \frac{\partial^2\beta}{\partial z^2},$$

где z — есть координата вдоль цепочки, \varkappa — безразмерный коэффициент, характеризующий “однородность” цепочки, т. е. как форму очагов-блоков, так и упругие параметры среды вдоль цепочки. По форме очаги сильнейших землетрясений, как правило, близки к овальной, а упругие параметры среды вдоль цепочки изменяются незначительно. Поэтому можно принять $\varkappa = 1$.

Окончательно уравнение движения для очага-блока с координатой z в момент времени t можно записать в виде

$$I\ddot{\beta} = -6\pi^2\omega(3V/4\pi)^{4/3}(\rho G/15)^{1/2}\sin\frac{\beta}{2} + WV\frac{\partial^2\beta}{\partial z^2}. \quad (1)$$

3. Решение задачи

Произведем следующую замену:

$$\theta = \frac{\beta}{2}; \quad K_0^2 = \frac{3\pi^2\omega}{WV}(3V/4\pi)^{4/3}(\rho G/15)^{1/2}; \quad \frac{1}{c^2} = \frac{1}{WV}.$$

Тогда (1) переписется в виде

$$\frac{\partial^2\theta}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\theta}{\partial t^2} = K_0^2\sin\theta. \quad (2)$$

Полученное уравнение, к решению которого свелась наша задача, называется уравнением Синус—Гордона [4]. К решению такого уравнения сводится достаточно большое количество разнообразных физических задач [5], в том числе о распространении солитонов в одномерной цепочке спинов [6], в молекулярных структурах [7] и др.

Как известно [4, 5], решением уравнения (2) являются:

1. Функция вида

$$\theta(z, t) = 4\text{arctg} \exp[\pm K_0\gamma(z - vt - z_0)], \quad (3)$$

где $\gamma = [1 - (v^2/c^2)]^{-1/2}$, а v и z_0 — постоянные интегрирования. Оба решения описывают локализованное изменение угла от двух эквивалентных направлений $\theta = 0$ и $\theta = 2\pi$, что в случае, если полученные решения имеют смысл для нашей задачи, означает поворот вектора дипольного момента (соответствующего моменту сил, действующему на поворачивающийся очаг землетрясения) в плоскости на интервале $\xi = z - vt = 1/K_0\gamma$. Эти локализованные решения принято называть солитоном (со знаком $+$) и антисолитоном (со знаком $-$).

2. Комбинация, состоящая из солитона и антисолитона, получившая название “бризер”.

3. N -солитонное решение.

4. Обсуждение результатов

Проведенный в работе анализ подтверждает высказанное ранее [8] предположение о том, что миграция сейсмичности вдоль окраины Тихого океана должна описываться солитоноподобным решением уравнения Синус — Гордона. По сути, аналогичный вывод независимо был получен в работе [9], где для объяснения эффектов миграции на больших расстояниях было получено нелинейное автоволновое уравнение и построено его решение в виде уединенной тектонической волны.

Нелинейные уравнения, решением которых являются уединенные волны, в том числе и уравнение (2), до конца не исследованы. Однако их теоретический анализ и численное моделирование с использованием ЭВМ позволили установить определенные свойства, присущие решениям этих уравнений [5, 10]. На некоторых из них мы и остановимся ниже.

1. Уравнение (2), как легко можно убедиться, инвариантно относительно преобразования Лоренца. Отсюда с очевидностью следует, что решения в виде солитонов (3) многими своими свойствами должны напоминать элементарные частицы.

В случае нашей задачи “прообразом” частицы, очевидно, должен являться сейсмофокальный тектонический блок-очаг сильнейшего землетрясения, поворачивающийся в условиях вращающейся планеты. При этом, сильнейшему землетрясению (очагу-блоку) можно поставить в соответствие векторную величину, имеющую дипольную природу. Однако природа дипольного момента определяется не наличием соответствия между уединенной (не взаимодействующей с другими в цепочке) дислокацией и полем порождаемых ею упругих напряжений, как принято в дислокационных моделях, основанных на теории упругой отдачи [11], а моментами сил взаимодействующих очагов-блоков. Другими словами, природа дипольного момента очага-блока обусловлена вращением планеты. В случае отсутствия взаимодействия между очагами сильнейших землетрясений, как показано в [3], обе модели — и основанная на теории упругой отдачи [11], и ротационная [1–3] — для дальней зоны дают практически совпадающие результаты.

Прообразом “волновой” составляющей такого своеобразного “дуализма”, присущего сейсмическому процессу, являются уединенные волны миграции сильнейших землетрясений,

являющиеся решениями уравнения (2), имеющие тектоническую природу [9] и обеспечивающие перенос сейсмической энергии в горизонтальном направлении (гипотеза К. Моги [12], подтвержденная данными, полученными на основании анализа пространственно-временных закономерностей (миграции) распределения сильных тихоокеанских землетрясений [13, 14]).

Как видим, высказанная ранее гипотеза о "дуализме" сейсмического процесса [15] в рамках модели ротационного очага сильнейшего землетрясения находит свое естественное обоснование.

2. Бризер (дууплет) представляет собой устойчивое решение, объединяющее пару солитон — антисолитон и имеющее внутреннюю колебательную структуру [5] в виде осцилляций солитона и антисолитона относительно их центра масс.

Вращения у солитона и антисолитона направлены в противоположные стороны. Поэтому интерпретируя бризерные решения и учитывая при этом полученные ранее результаты относительно взаимного направления моментов сил взаимодействующих очагов-блоков [3], можно сделать следующий вывод: бризер, как решение уравнения (2), может соответствовать повторяющимся в одном месте землетрясениям-дууплетам типа камчатских сильнейших землетрясений 17.X.1737 и 4.XI.1952, которые описаны в работе [16]. На возможность такой интерпретации землетрясений-дууплетов указывалось ранее [8]. По-видимому, в рамках предлагаемой ротационной модели очага аналогичным образом могут быть интерпретированы и сильнейшие нанкайские землетрясения-дууплеты, а именно, события 31.I.1605 и 28.X.1707, полные данные о которых представлены в [17].

3. На материале инструментальных сейсмологических наблюдений для северо-западной окраины Тихого океана протяженностью около 10000 км (Япония — Курилы — Камчатка — Алеутские о-ва — Аляска) ранее нами было выделено несколько миграционных цепочек, вдоль которых располагаются очаги сильнейших землетрясений 1900 – 1990 гг. При этом цепочки следуют друг за другом примерно через 10 лет [18]. По-видимому, это указывает на то, что в рамках ротационной модели должно существовать и N -солитонное решение уравнения (2). Тогда, поскольку полное вращение в системе должно сохраняться неизменным, при любом столкновении солитонов не будет изменяться и разность числа солитонов и антисолитонов. Следовательно, солитоны должны появляться и разрушаться парами [10].

Такое свойство солитонных решений, по-видимому, может объяснить следующие данные, пока не укладывающиеся в рамки существующих моделей очага землетрясения, в основе которых заложена теория упругой отдачи. Известно большое количество примеров, когда сильнейшие землетрясения происходят "парами", т. е. регистрируются на больших расстояниях (значительно превышающих размеры их очагов) в течение коротких (менее года), значительно (на несколько порядков) меньших продолжительности одного характерного периода сейсмического процесса — сейсмического цикла продолжительностью 100–200 лет — отрезков времени. К такого рода событиям, очевидно, следует относить и так называемые "удаленные" афтершоки и форшоки.

Возможность интерпретации в рамках ротационной модели экспериментальных пар удаленных землетрясений модельными парами солитонов указывает на следующее: взаимодействие между сейсмофокальными очагами-блоками сильнейших землетрясений, описываемое в рамках солитонной ротационной модели, распространяется на большие расстояния. Другими словами, ротационная модель, в которой уравнение движения очага-блока описывается уравнением (2), по сути, является дальнодействующей. Впрочем, вывод о дальнодействии взаимодействия между очагами-блоками очевиден и является элементар-

ным следствием планетарного масштаба ротационной модели: само существование солитонов обязано вращению Земли.

5. Заключение

В работе показано, что с помощью солитонных решений уравнения Синус — Гордона, полученных в рамках ротационной модели очага сильнейшего землетрясения, в принципе, можно объяснить такие важные свойства сейсмического процесса, протекающего в пределах окраины Тихого океана, которые не могут быть объяснены в рамках ныне существующих механических моделей очага землетрясения. Это позволяет на следующих этапах работы в рамках ротационной солитонной модели на новом качественном и количественном уровнях перейти как к физическому осмыслению и, возможно, переосмыслению параметров, характеризующих сейсмический процесс, так и к построению статистической механики землетрясений.

Список литературы

- [1] VIKULIN A. V., IVANCHIN A. G. A model of inertial earthquake's source. In *"L. P. Zonenshain memorial conference on plate tectonics: ИО ПАТ, GEOMAR"*. Moscow, November 17–20, Kiel, Germany, 1993.
- [2] Иванчин А. Г., Викулин А. В. Ротационная модель сейсмического процесса в пределах окраины Тихого океана. В *"Закономерности строения и эволюции геосфер"*, Хабаровск, 1994, 49–50.
- [3] Викулин А. В., Иванчин А. Г. Ротационная модель очага тектонического землетрясения. *Вулканология и сейсмология*, №6, 1995.
- [4] Владимирова В. С. *Уравнения математической физики*. Наука, М., 1988.
- [5] Лонгрен К., Скотт Э. *Солитоны в действии*. Мир, М., 1981.
- [6] Изюмов Ю. А. Солитоны в квазиодномерных магнетиках и их исследование с помощью рассеяния нейтронов. *УФН*, **155**, вып. 4, 1988, 553–592.
- [7] Давыдов А. С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах. *УФН*, **138**, вып. 4, 1982, 603–643.
- [8] Викулин А. В. Сейсмичность и вращение Земли. В *"Вычислительные технологии"*, ИВТ СО РАН, Новосибирск, **1**, №3, 1992, 124–130.
- [9] Маламуд А. С., Николаевский В. Н. *Циклы землетрясений и тектонические волны*. Душанбе, 1989.
- [10] Скотт С., Чжу Ф., МакФлин Д. Солитон — новое понятие в прикладных науках. *ТИИЭР*, **61**, 1973, 79–123.
- [11] Касахара К. *Механика землетрясений*. Мир, М., 1985.

- [12] MOGI K. Migration of seismic activity. *Bulletin of Earthquake Research Institute*, **46**, 1968, 53–73.
- [13] ЖАДИН В. В. Пространственно-временные связи сильных землетрясений. *Изв. АН СССР, Физика Земли*, №1, 1984, 34–38.
- [14] Андронов И. В., Жадин В. В., Поташников И. А. Пространственно-временная структура миграции землетрясений и сейсмические пояса. *Докл. АН СССР*, **306**, №6, 1989, 1339–1342.
- [15] Викулин А. В. Физика волнового сейсмического процесса. *Природа*, №7, 1992, 11–19.
- [16] Викулин А. В. Миграция очагов сильнейших Камчатских и Северо-Курильских землетрясений и их повторяемость. *Вулканология и сейсмология*, №1, 1992, 46–61.
- [17] Викулин А. В., Викулина С. А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе жёлоба Нанкай. КГС ИФЗ АН СССР, Петропавловск-Камчатский, препринт №5, 1989.
- [18] Викулин А. В. Феноменологическая волновая модель сейсмического процесса. *Докл. АН СССР*, **310**, №4, 1990, 821–824.

Поступила в редакцию 15 сентября 1995 г.