

1. Существование в ВТСП групп элементов, образующих ковалентно-связанные комплексы, является обязательным.

2. Элементы, входящие в состав новых ВТСП и участвующие в образовании ковалентных связей, должны иметь по возможности меньший ионный радиус. Это условие обеспечивает минимальную обменную корреляционную длину и увеличение параметра спин-фононной связи ξ (6).

3. Элементы, входящие в состав новых ВТСП, должны иметь по возможности низкий потенциал ионизации и высокую валентность. Выполнение этого условия также ведет к увеличению параметра (6) благодаря возрастанию величины $g=U/J_0$ (U — электрон-ионный потенциал).

4. Элементы, входящие в состав новых ВТСП, должны иметь по возможности меньшую массу.

5. Синтезируемые новые ВТСП должны иметь тенденцию к установлению антиферромагнитного дальнего порядка по мере уменьшения температуры вплоть до нуля. Антиферромагнитный дальний порядок должен устанавливаться в системе элементов, участвующих в образовании ковалентных связей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bednorz J. G., Muller K. A. // Z. f. Phys. B. 1986. 64, N 2. P. 189.
2. Cava R. J., Dover R. B., Batlogg B., Reitman E. A. // Phys. Rev. Lett. 1987. 58, N 4. P. 408.
3. Савченко М. А. // Обзоры по высокотемпературной сверхпроводимости. М., 1990. Вып. 1. С. 3.
4. Ильичев В. И., Савченко М. А., Стефанович А. В. Высокотемпературная сверхпроводимость керамических систем. М., 1992.
5. Боголюбов Н. Н., Аксенов В. Л., Плакида Н. М. // ТМФ. 1992. 93, № 3. С. 371.
6. Соорег М. // Cryogenics. 1992. 32, N 4. P. 338.
7. Савченко М. А., Стефанович А. В. Флуктуационная сверхпроводимость магнитных систем. М., 1986.
8. Боголюбов Н. Н. (мл.), Садовников Б. И. Некоторые вопросы статистической механики. М., 1975.
9. Савченко М. А. // ФТТ. 1994. 6, № 3. С. 864.
10. Харрасов М. Х. // ДАН. 1994. 335, № 2. С. 175.
11. Биржено Р. Дж., Ширай Дж. // Физические свойства высокотемпературных сверхпроводников / Под ред. Д. М. Гинзберга. М., 1990. С. 163.
12. Савченко М. А., Стефанович В. А. // Обзоры по высокотемпературной сверхпроводимости. М., 1991. Вып. 6. С. 3.

Поступила в редакцию
25.04.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА, АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 36, № 2

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.348

АКТИВИЗАЦИЯ РАЗЛОМОВ В ПОЛЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Е. В. Воронина, А. В. Люсица

(кафедра физики Земли)

Пространственная ориентация разрывов в областях сильных землетрясений происходит в соответствии с ориентацией внешнего по отношению к разрыву поля напряжений. Изменение направления возможного вспарывания может быть определено

по величине сдвигаемых в процессе землетрясения напряжений, что иллюстрируется анализом активизации разломов по эпицентрам афтершоков Коалинжского землетрясения на западном побережье США.

В областях повышенной сейсмической активности процесс разрушения реальной среды сопровождается образованием упорядоченных зон локализации деформации в виде системы трещин или разрывов разных масштабов. Закономерности этого процесса мало изучены. Известно, например, что ориентация плоскости подвижек форшоковых событий, как правило, не совпадает с ориентацией плоскости основного разрыва [1]. Кроме того, вектор напряжений на краях растущего разлома; как правило, находится вне плоскости разлома, что приводит к обширным микроразрушениям по краям разлома и скачкообразному распространению разрушения в объеме упругой среды. Таким образом, анализ трещиноватой среды в условиях внешних напряжений позволяет выявить фундаментальные характеристики сейсмического процесса и в том числе описать процесс разрушения в среде до того момента, как он достигнет стадии формирования магистрального разрыва.

Сложность анализа заключается в том, что задача неустойчивости горных массивов в условиях изменяющегося поля напряжений не может быть точно сформулирована в общем виде [1].

Обычно модель реальной среды представляется в виде упругой области с распределенными в ней слабозаимодействующими или одиночными трещинами. Сгущаясь под действием поля напряжений, трещины формируют определенным образом ориентированные разломные структуры. Принято считать, что берега разломов, выходящих на земную поверхность, взаимодействуют между собой по закону сухого трения, причем жесткость в полости разлома ниже, чем в окружающей его среде. Трещины могут быть также газо- или жидконаполненными, и тогда изменение давления газа или жидкости может стать спусковым механизмом сейсмической активности [2]. Берега трещины взаимодействуют между собой с образованием областей раскрытия и наложения, зон сцепления и скольжения. Процесс скольжения в результате изменения действующей нагрузки может активизироваться или остановиться. Это зависит от ориентации плоскости разрыва относительно локального поля напряжений [3, 4]. Часть трещин, благоприятно ориентированных в поле напряжений, будет развиваться, увеличиваясь в размерах и изменяя свою геометрию; другие, неблагоприятно ориентированные, будут закрываться и прекратят свое существование. Геометрия активизации существующих разломов и образования новых трещин в заданном поле внешних напряжений определяется распределением нормальных и тангенциальных составляющих напряжений на поверхности разрыва и, как утверждают авторы [3], может быть рассчитана без решения общей краевой задачи.

Аналитически задача формирования структур разрушения в трещиноватой среде в условиях внешней нагрузки решена в работах [2—5]. Мы используем результаты этих работ для исследования процесса релаксации упругой среды после сильного Коалинжского землетрясения в мае 1983 г. на западном побережье США.

Основные принципы методики исследования

Рассмотрим линейно-упругое полупространство с разрывом в виде плоской изотропической трещины длиной $2A$ и шириной $2B$, причем $L \gg B$. В декартовой системе координат (x_1, x_2) , начало которой

связано с центром трещины, а ось x_1 направлена вдоль разреза, поле внешних напряжений зададим таким образом, чтобы главные оси тензора напряжений удовлетворяли соотношениям $\sigma_1 > \sigma_2$, $\sigma_3 = 0$ (рис. 1).

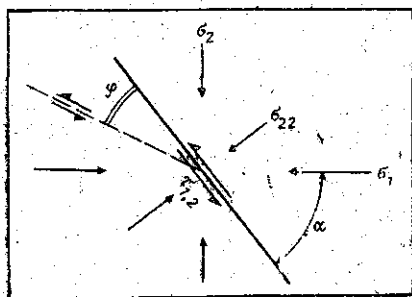


Рис. 1. Модель разрыва в условиях плоско-напряженного состояния: σ , τ — нормальная и тангенциальная составляющие поля напряжений; α — угол между максимальной составляющей тензора напряжений и направлением вспарывания

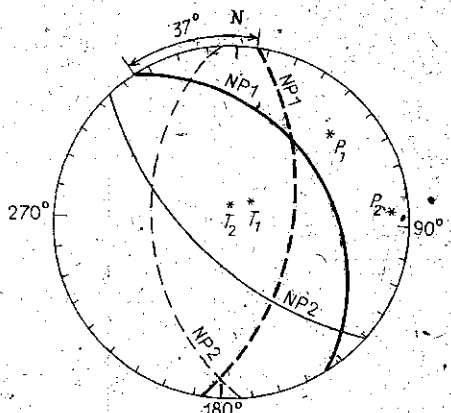


Рис. 2. Иллюстрация механизмов очага основного события (сплошная линия) и сильнейшего афтершока (штриховая): $NP1$, $NP2$ — nodальные плоскости, причем $NP1$ — плоскость подвижки; P_1 , T_1 — выход осей сжатия и растяжения на поверхность

Пусть это будет поле сжимающих напряжений и σ_1 , максимальная главная ось напряжения сжатия, составляет угол α с линией разреза. Заданное поле напряжений является напряжением одноосного сжатия и описывает смещения по разломам типа чистого взброса (сброса) или чистого сдвига. Берега трещины в поле внешних напряжений взаимодействуют между собой по закону Кулона [5].

Напряженное состояние на берегах разреза может быть представлено в виде суперпозиции, соответствующей нормальному и сдвиговому напряжениям вдоль трещины. Под действием нормального напряжения берега трещины будут смыкаться и размыкаться. В результате действия сдвигового напряжения возникают зоны сцепления и области взаимной подвижки. Ориентация разрывов, сопровождающихся скачками смещения, определяется ориентацией сдвигового напряжения. Если принять, что $u = u_1^+ - u_1^-$ — скачок смещений на трещине, а Φ — нагрузка, то при нагружении тела с трещиной различают два состояния среды: $du/d\Phi > 0$ — нагрузка, $du/d\Phi < 0$ — разгрузка. Состояние разгрузки соответствует афтершоковой стадии сейсмического процесса.

Перед основным толчком среда бывает нагружена до значения $\Phi = \Phi_1$. Краевая задача для изменения напряжений $\sigma_{12}(x_1, 0, \Phi_1)$ в процессе разгрузки вдоль трещины к моменту окончания нагрузки формулируется следующим образом [2]:

$$\sigma_{12}^\pm(x_1, 0, \Phi_1) = -\mu \sigma_{22}(x_1, 0, \Phi) \operatorname{tg} \varphi, \quad 0 < x_1 < L,$$

где σ_{22} , σ_{12} — нормальная и тангенциальная составляющие напряжений вдоль разреза, μ — коэффициент трения между берегами разреза, φ — угол между осью x_1 и трещиной.

При этом

$$\varphi = \operatorname{arctg}(\Phi_1 + \Phi) / \mu (\Phi_1 - \Phi), \quad 0 < \varphi < \pi/2.$$

Отсюда следует интересный вывод, что в однородной среде ориентация первоначального вспарывания зависит только от упругих

свойств среды и ориентации поля внешних напряжений и не зависит от размера и формы разрыва [4].

Если направление регионального вектора напряжений задано углом α_0 относительно ориентации вектора первоначального вспарывания в среде, то ориентация последующего вспарывания определится из условия [2]

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \operatorname{tg} \alpha_0 / \mu, \quad (1)$$

здесь φ_0 — угол простираания активизирующегося разлома относительно первоначального.

При снятии напряжений после землетрясения происходит переориентация направления возможного вспарывания на направление, соответствующее простираанию благоприятно ориентированных в измененном поле напряжений трещиноватых структур. Условия активизации уже существующего разлома или образования нового возможны при $\sigma_{12} > \mu(B/2)L\Omega$, где Ω — эффективный коэффициент Пуассона [2].

Для плоского напряженного состояния [2]

$$\Omega = (3 - \nu)/(1 + \nu),$$

здесь ν — коэффициент Пуассона в среде без разрывов.

Измененное направление вспарывания определяется углом [6]

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} [(\sigma_1 - \sigma_2)/\Omega (\sigma_1 + \sigma_2)]. \quad (2)$$

Таким образом, каждый последующий акт разрыва будет как бы поворачивать плоскость подвижки относительно предыдущего ее простираания на некоторый угол φ . В результате фокальные плоскости форшоковых событий не будут совпадать с плоскостями магистрального разрыва, а ориентация площадок разрыва ранних афтершоков будет отличаться от ориентации более поздних событий. Зная ориентацию магистрального разрыва и главные значения эффективных снимаемых напряжений в процессе основного события, можно расчитать локализацию возможных афтершоков и определить области наибольшего сейсмического риска и тем самым предсказать возможное развитие сейсмического процесса в пространстве.

Данные о Коалингском землетрясении 1983 г.

Сильное землетрясение на западном побережье США произошло 2 мая 1983 г. в 23 ч 42 мин 38,1 с. Магнитуда по поверхностным волнам 6,7; координаты гипоцентра $36^{\circ}13,96'$ с. ш., $120^{\circ}18,57'$ з. д., глубина основного толчка составляла 10 км. Эпицентр землетрясения был расположен в 35 км от разлома Сан-Андреас [6, 7].

Нами использовался каталог данных, любезно предоставленный Донной Эберхарт-Филлипс и содержащий сведения о 1600 афтершоках этого землетрясения и механизмах очага наиболее сильных из них. Согласно этим данным, основное событие произошло вблизи гребня антиклинали Коалинга и представляло собой чистый взброс, что соответствует одноосному нагружению в режиме сжатия. Длина разрыва на земной поверхности составила около 8 км. Область основного толчка представляла собой объем более или менее однородной структуры земной коры. Это приводит к идентичности механизмов очагов ранних афтершоков.

Однако, как следует из анализа механизмов очага, процесс вспарывания в области источника сопровождался переориентацией плоскости подвижки [6].

Процесс активизации разломов в зоне землетрясения

Смещение берегов разреза в очаговой области основного толчка представляло собою надвиг по плоскости, простирающейся в азимуте 325° и падающей под углом 30° в направлении на юго-запад. Региональное поле напряжений сжатия было ориентировано в азимуте 47° . Сейсмические приборы, установленные Геологической службой США, позволили с высокой степенью надежности определить гипоцентры афтершоков и механизмы очага.

Рисунок 2 иллюстрирует механизмы очага основного события и одного из сильных афтершоков в проекции на нижнюю полусферу сетки Вульфа. Оба события были типа надвига. Простираение плоскости подвижки изменилось для афтершока на 15° . Ориентация выхода оси сжатия также изменилась с 41 до 71° .

Оценим прежде всего по формуле (1) ориентацию первоначального вспарывания в горизонтальной плоскости.

Коэффициент трения в среде примем равным $0,6$ [1]; направление первоначального вспарывания разлома относительно регионального поля напряжений должно быть ориентировано под углом 100° к региональному и составлять угол, равный 147° , относительно направления на север. Этот угол хорошо согласуется с азимутом основного события, равным $(145 \pm 180)^\circ$. Заметим, что аналогичное простираение имеет и разлом Сан-Андреас [6].

Поворот плоскости подвижки начинается с достаточно сильного афтершока, имевшего место 3 мая 1983 г. в 14 ч 50 миң 46,7 с. Простираение плоскости подвижки для этого события соответствует азимуту 355° . За ним следует серия событий с простираением, близким к этому направлению. Согласно данным, полученным в работе [7], отношение эффективных снимаемых напряжений $(\sigma_1 - \sigma_2) / (\sigma_1 + \sigma_2)$ во время основного толчка составило $0,49$. Тогда, по формуле (2), переориентация направления вспарывания за счет снятия напряжений возможна в направлении, отличающемся от первоначального на угол $35,6^\circ$.

На рис. 3 показаны эпицентры ранних афтершоков в декартовой системе координат. Как следует из рисунка, изменение направления простираения составило угол, близкий к расчетному. Заметим, что изменение простираения области афтершоков отмечалось в работе [6].

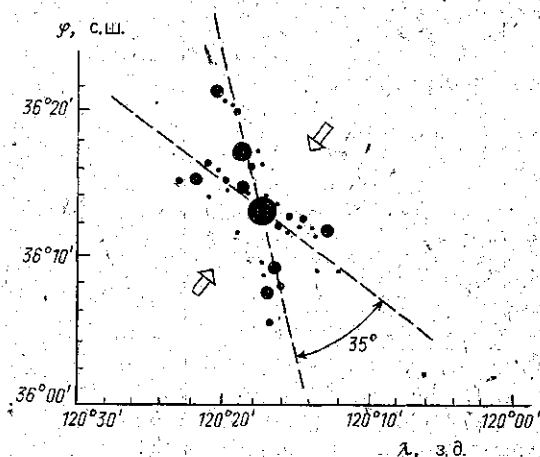


Рис. 3. Положения эпицентров: основного события и ранних афтершоков; стрелками указана ориентация регионального напряжения сжатия.

Заключение

На основании проведенного исследования могут быть сделаны следующие выводы.

1. Активизация разломов зависит от ориентации поля внешних

напряжений, соотношения нормальных и тангенциальных составляющих на поверхности разрыва, а также от размера и формы разрыва.

2. Направление активизации и развития разломов может быть определено по величине сброшенного напряжения в процессе предшествующего события.

3. Описанная методика позволяет рассчитать изменение направления вспарывания в очагах землетрясений типа чистого взброса или чистого сдвига и предсказать возможное развитие сейсмического процесса в пространстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райс Дж. Механика очага землетрясения. М., 1982.
2. Житников Ю. В., Тулинов Б. М. // Изв. АН СССР, Механика тв. тела. 1984. № 5. С. 44.
3. Гольдштейн Р. В., Житников Ю. В. // Пластичность и разрушение твердых тел. М., 1988. С. 57.
4. Гольдштейн Р. В., Капнов А. В. // Изв. АН СССР. Механика тв. тела. 1982. № 4. С. 173.
5. Житников Ю. В., Тулинов Б. М. // Там же. С. 168.
6. Eberhart-Phillips D. // J. Geophys. Res. 1989. 94. P. 15.565.
7. Michael A. J. // J. Geophys. Res. 1987. 92. P. 7963.

Поступила в редакцию
21.03.94

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3, ФИЗИКА, АСТРОНОМИЯ. 1995. Т. 38, № 2

УДК 551.466

НОВОЕ ЭВОЛЮЦИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДЛИННЫХ ВОЛН НА ВОДЕ

С. А. Арсеньев, М. М. Вахрушев, Н. К. Шелковников

(кафедра физики моря и вод суши)

Получено эволюционное уравнение, обобщающее уравнение Кортевега—де Фриза на случай учета высших приближений по параметрам амплитудной и фазовой дисперсии. Новое уравнение более точно описывает высокочастотное крыло спектра длинных волн на воде.

В последнее время в физических исследованиях интенсивно изучаются различные модификации уравнения Кортевега—де Фриза (КдФ). Чаще всего они содержат высшие производные относительно неизвестной величины. Например, в [1] для описания неустойчивых дрейфовых волн в плазме предложено уравнение

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \alpha \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \beta \frac{\partial^5 u}{\partial x^5} + \gamma \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0, \quad (1)$$

которое при $\alpha=0$ и $\gamma=0$ превращается в обычное КдФ, а при $\beta=0$ может описывать и химические реакции с турбулентным перемешиванием [2, 3]. Здесь же, в [1], приведены результаты решения уравнения (1) при всех положительных коэффициентах в левой части. В работах [4, 5] уравнение типа (1), но с отрицательными коэффициентами α и γ получено при изучении сейсмических волн. В [6, 7] изучались решения КдФ с пятой производной, описывающие электромагнитные и сейсмические волны:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 u}{\partial x^3} + \delta \frac{\partial^5 u}{\partial x^5} = 0, \quad (2)$$