

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ ПОДГОТОВКИ
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

ՄԿՐՏՉԻԱՆ Մ. Ս.*, ԽԱՇԻԿՅԱՆ Ա. Ս.

Մ. Ս. ՄԿՐՏՉԻԱՆ, Ա. Ս. ԽԱՇԻԿՅԱՆ

ԵՐԿՐԱՇԱՐԺԻ ՆԱԽԱՊԱՏՐԱՍՏՈՒԹՅԱՆ ԱԿՏԻՎ ՏԵՐՈՒՅԹԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Դիտարկված են երկրաշարժի նախապատրաստության պրոցեսները տարրեր ֆիզիկական բնույթի կանխանշանների և ընթացող պրոցեսների ուժգնությունից միջև քանակական կապ հաստատելու նպատակով: Առաջարկվում է մտցնել որոշակի լոկալ կապ ընթացող պրոցեսների ուժգնության և երկրակեղևի դեֆորմացիաների միջև, որ ստեղծում է հոծ միջավայրի մեխանիկայի ապարատի օգտագործման հնարավորություն:

Առաջարկված ֆունկցիոնալ կապի հիման վրա ստացված են կանխանշանների մեծության զնահատականներ և նախապատրաստության ընթացող պրոցեսների ինտեգրալ բնութագրիչների որոշման համար կառուցված է տրանսցենդենտ հավասարումների համակարգ: Միաշափ դեպքի համար ստանախրված է երկրաշարժի օջախի զաթզացման ընթացքի վրա նախապատրաստության պրոցեսի ազդեցությունը:

M. S. MKRTCHIAN, A. S. KHACHIKIAN

THE LOCATION OF ACTIVE REGION
PREPARATION OF EARTHQUAKES

Процессы подготовки (ПП) землетрясений обсуждены многими исследователями в их связи с прогнозом землетрясений. Из-за невозможности непосредственного наблюдения за реальными ПП истинность предложенных гипотез проверяется по косвенным критериям—возможности качественного и количественного объяснения появления наблюдаемых предвестников и подобно завершающей картины процесса сейсмологическим данным о зарегистрированных землетрясениях. Однако, в большинстве случаев эти обсуждения носят качественный характер и только небольшое число публикаций содержит количественный расчет в достаточно строгой постановке. Установление количественной связи между величинами наблюдаемых предвестников и характеристиками предполагаемых ПП связано с преодолением определенных трудностей, что и служит темой данной статьи.

1. Высказаны разные идеи о сущности физических процессов, происходящих при подготовке землетрясений. В одних из них, в той или

* совместно с М. С. Мкртчяном выполнен п. 4 статьи

иной мере близких к теории упругой отдачи Рейда, преобладает понимание ПП как механических актов движения и взаимодействия иерархической системы блоков земной коры с привлечением идей механики разрушения [1—4]. В других идеях придается преобладающее значение участию в ПП различных физических и химических процессов: потоку вещества и энергии из мантии, диффузии и фильтрации флюидов, изменению физико-механических свойств и состояний пород под влиянием флюидов и других факторов [5—6]. В качестве предвестников воспринимаются отличные от фоновых значений наблюдаемые величины деформаций земной коры, характеристик распространения упругих волн, напряженности поля земных токов, электросопротивления горных пород, характеристик состава и состояния подземных вод и других проявлений ПП.

Так или нет в действительности, но мы вынуждены признать возможность существования разных типов ПП и принять к обсуждению разные идеи. Также мы в настоящее время не в состоянии уверенно разобраться, какие из наблюдаемых предвестниковых явлений являются просто случайными, сопутствующими в рассматриваемом регионе, и какие качественно и количественно однозначно связаны с интенсивностью протекающих ПП.

Подходя с конца проблемы, сформулируем, что же мы хотели бы иметь.

С одной стороны, мы имеем некоторые наблюдаемые физические величины, отклонение которых от обычных, фоновых значений $P(x, t)$ воспринимаются нами как предвестниковые величины. В то же время мы предполагаем, что в очаговой области будущего землетрясения происходят некоторые физические процессы, характеризующиеся своей интенсивностью $f(x, t)$, развитие которых приводит к землетрясению, а процесс их развития отражается в поведении предвестников. Очевидно, что нам желательно иметь функциональную связь

$$P_{ij}(x, t) = \int_{\Omega} \int_0^t f_j(\xi, \tau) K_{ij}(x, t, \xi, \tau) d\omega d\tau \quad (1)$$

Здесь $P_{ij}(x, t)$ — значение i -ого предвестника согласно j -ой гипотезе о ПП в точке наблюдения с координатами x в момент времени t , $f_j(x, t)$ — интенсивность ПП согласно j -ой гипотезе в соответствующей точке. Ядро функционала $K_{ij}(x, t, \xi, \tau)$ должно быть определено применительно к каждому предвестнику и гипотезе о ПП. Интеграл распространяется на всю активную область Ω подготовки землетрясения. В дальнейшем индексы опускаем.

Рассматривая интенсивность $f(x, t)$ как внешнее воздействие на состояние физического поля, значение которого на поверхности земной коры представляет собой наблюдаемые предвестники $\lim_{x \rightarrow x_f} U(x, t) = P(x, t)$, можем написать



$$L(U(x,t), f(x,t))=0 \quad (2)$$

Здесь L —дифференциальный оператор, характеризующий физическое поле определенного предвестника.

Очевидно, что функционал (1) есть результат интегрирования уравнения (2).

При построении, в конкретном случае, функционала (1), оценивая $f(x, t)$ на основании физических соображений и имеющегося опыта, можно провести сравнение поведений вычисленных предвестников и их реально наблюдаемых значений. Такое сопоставление поможет реально оценить предложенную идею о ПП не только качественно, но и количественно и может использоваться также в практических вопросах прогноза землетрясений.

Во многих случаях ПП можно рассматривать как квазистатические, медленные процессы. Тогда вместо (1) будем иметь

$$\Pi(x,t) = \int_{\Omega} f(\xi,t)K(x,\xi)d\omega \quad (3)$$

В принципе, такой подход реализован в работах [1, 7—9]. В [1, 7] за внешнее воздействие (интенсивность ПП) принято изменение модуля упругости пород в активной области. Тогда (2)—уравнения теории упругости, $\Pi(x, t)$ —деформации земной коры. Оценивая изменения упругих постоянных, авторы обсуждают возможности предложенной консолидационной гипотезы. В [8, 9] в качестве внешнего воздействия приняты объемные деформации теплового типа, построен в этом частном случае функционал (3) и проводятся сходные обсуждения.

2. Описанный в п. 1 подход для количественного анализа ПП имеет один существенный недостаток: количество подлежащих построению функционалов (3) достигает нескольких сотен, так как количество наблюдаемых предвестников, а также выдвинутых гипотез о ПП достигает нескольких десятков. При этом, если даже все эти функционалы будут построены, получение равноценных сравнимых оценок для различных физических процессов при известных точностях исходных данных весьма проблематично.

Задача может быть намного упрощена, если мы примем, что интенсивность происходящих процессов ПП локально эквивалентна некоторым деформациям

$$f(x,t) \sim \varepsilon(x,t) \quad (4)$$

Это тождественно для гипотез, рассматривающих ПП как механические процессы взаимодействия блоков земной коры. Такая эквивалентность имеет место и при воздействии несвязанных физических полей, например, при распространении тепла. Тогда, роль соответствующих дифференциальных уравнений (2) выполняют уравнения механики сплошной среды, в частности, теории упругости и можно пользоваться развитыми мощными методами. При таком подходе разные

физические процессы рассматриваются независимо и в общие уравнения входят на основании локального физического соотношения (4). Общая краевая задача ставится и решается методом механики сплошной среды, чем обеспечивается одинаковая, сравнимая точность при обсуждении разных физических идей.

3. Рассмотрим практически важный случай ПП, выражающийся в изменении объема (дилатации) в активной области. С учетом соотношения (4) имеем

$$\Pi(x, t) = \int_{\Omega} \varepsilon(x, t) K(x, \xi) d\omega \quad (5)$$

где $\varepsilon(x, t)$ — объемные деформации.

Для предвестников — деформаций поверхности Земли — явное выражение (5) приведено в [8, 9]. Для составляющего горизонтального перемещения, например, имеем

$$K(x, \xi) = A(x_1 - \xi_1) [R_1^{-3} + (3 - 4\nu)R_2^{-3} - 6x_2(x_2 + \xi_2)R_2^{-5}]$$

$$\text{где } R_{1,2} = [(x_1 - \xi_1)^2 + (x_2 - \xi_2)^2 + (x_3 - \xi_3)^2]^{1/2}$$

Из (5) могут быть получены некоторые оценки для величин ожидаемых предвестников.

3.1. Применив к (5) неравенство Коши-Буняковского, получим

$$|\Pi(x, t)| \leq E(t) \cdot k(x, \Omega) \quad (6)$$

где

$$E = \left| \int_{\Omega} \varepsilon^2(\xi, t) d\omega \right|^{1/2}; \quad k(x, \Omega) = \left| \int_{\Omega} K^2(x, \xi) d\omega \right|^{1/2}$$

Очевидно, что в рассматриваемом случае E пропорциональна запасенной упругой энергии $E = (mE_0)^{1/2}$.

Используем известные эмпирические связи [10, 11]

$$\lg E = aM + b \quad (7)$$

$$E = eV = eL^3$$

где M — магнитуда; a, b, e — постоянные; V — объем; L — характерный размер очага, получим

$$\begin{aligned} |\Pi(x, t)| &\leq m^{1/2} E_0^{1/2} k(x, \Omega) \\ |\Pi(x, t)| &\leq m^{1/2} \cdot 10^{0.5(aM+b)} k(x, \Omega) \\ |\Pi(x, t)| &\leq m^{1/2} e^{1/2} V^{1/2} k(x, \Omega) = m^{1/2} e^{1/2} L^{3/2} k(x, \Omega) \end{aligned} \quad (8)$$

Таким образом, величины ожидаемых значений предвестников могут быть оценены в зависимости от энергии, магнитуды и характерных размеров очага готовящегося землетрясения. Отметим, что мы пока не делаем различий между всей запасенной в ходе подготовки упругой энергией и ее долей, выделяемой при землетрясении.

3.2. Полагая интенсивность объемных деформаций постоянной по активной области и равной некоторому ее среднему значению и опуская коэффициент пропорциональности, имеем

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon_0(t) = \sqrt{\frac{E_0}{V}} = \sqrt{e} \quad (9)$$

$$\Pi(x, t) = \varepsilon_0(t) \cdot k'(x, \Omega) \quad (10)$$

$$k'(x, \Omega) = \int_{\Omega} k(x, \xi) d\omega$$

Вводя здесь эмпирические связи (7), получим другие оценки для ожидаемых величин предвестников.

$$\begin{aligned} \Pi(x, t) &= e^{1/2} k'(x, \Omega) = \left(\frac{E_0}{V}\right)^{1/2} k'(x, \Omega) \\ \Pi(x, t) &= k'(x, \Omega) V^{-1/2} \cdot 10^{0.5(aM+b)} \\ \Pi(x, t) &= E_0^{1/2} L^{-3/2} k'(x, \Omega) \end{aligned} \quad (11)$$

Основным препятствием на пути применений соотношений (5), (8), (11) является неизвестность формы и расположения активной области Ω и поэтому может быть применен полуобратный метод (задаваясь Ω) анализа, а также анализ ситуаций прошлых землетрясений.

3.3. Предположим применимость принципа Сен-Венана в том смысле, что для величин наблюдаемых предвестников на удаленных станциях влияние формы активной области пренебрежимо мало. Тогда, принимая эту форму определенной (сфера, эллипсоид, призматическое тело), можно в (6, 8, 10, 11) вместо $k(x, \Omega)$, $k'(x, \Omega)$ написать $k(x, d)$, $k'(x, d)$, где d —вектор, размерность которого определяется количеством координат, определяющих положение и форму активной области при принятом предположении.

Тогда оценки (11) принимают вид

$$\begin{aligned} \Pi(x, t) &= E_0^{1/2} V^{-1/2} k'(x, d) \\ \Pi(x, t) &= k'(x, d) V^{-1/2} \cdot 10^{0.5(aM+b)} \\ \Pi(x, t) &= E_0^{1/2} L^{-3/2} k'(x, d) \end{aligned} \quad (12)$$

Подставив в левую часть (12) реально наблюдаемые значения предвестников поочередно для всех участвующих в наблюдениях станций, получим систему уравнений.

Таким образом, при наличии достаточного количества наблюдательных станций становится возможным определение положения и размеров активной области, а также текущего значения средней энергетической насыщенности и других интегральных характеристик активной области. Сравнение $e \leq e^*$, где e^* —критическое значение энергетической насыщенности, может использоваться, при некоторых

дополнительных предположениях [10, 11], для оценки времени готовящегося землетрясения.

4. Развитие процессов в активной области подготовки землетрясения приводит к разрушению в толще коры Земли и образованию очага землетрясения. Механика очага землетрясения изучена многими авторами [12]. Однако, многие аспекты сложного перехода квазистатических ПП в динамические процессы очага, в частности, влияние вида протекающих процессов на дальнейший ход событий, все еще не ясны. Рассмотрим с этой точки зрения один относительно простой, одномерный вариант.

Пусть активная область ПП представляет собой бесконечное призматическое тело, поперечные сечения которого остаются всегда плоскими. Для простоты примем, что по периметру эта область взаимодействует с окружающей средой, которая оказывает сопротивление ее движению, пропорциональное перемещениям. Это предположение не противостоит, пока перемещения и скорости имеют одинаковый знак.

В принятых условиях дифференциальное уравнение движения среды будет

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \alpha^2 u = \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial x} \quad (13)$$

Здесь $\tau = at$, $a = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ — скорость упругой волны, $\alpha = \frac{c}{a}$, $c^2 = \frac{kl}{\rho s}$, ρ — плотность, s — площадь поперечного сечения, l — периметр призматического тела, k — коэффициент сопротивления движению со стороны окружающей среды, ε_0 — внешнее воздействие в виде деформаций растяжения.

Предположим, что первоначальное полное сцепление с окружающей средой может нарушиться в следующем смысле. По достижению напряжений $\sigma = E \left(\frac{\partial u}{\partial x} - \varepsilon_0 \right)$ на элементарном участке Δl_1 значения $\sigma \gg [\sigma]$, на Δl_1 коэффициент, содержащий сопротивление среды α , меняется на $\alpha' < \alpha$ и в дальнейшем остается постоянным. Таким образом, участки с меньшим значением коэффициента сцепления могут только расширяться. Это условие в некоторой степени моделирует условия возникновения (зарождения) и развития трещины.

При таких предположениях рассмотрим задачу Коши для дифференциального уравнения (13) с начальными условиями

$$u|_{t=0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0 \quad (14)$$

Задача Коши решается численно. Принято $\Delta l_1 = 3\Delta x$, $\Delta x = 3\Delta \tau$.

Некоторые результаты расчета показаны на фиг. 1. Как видно из фиг. 1а, в обе стороны от возмущенного участка (0, b) распространя-

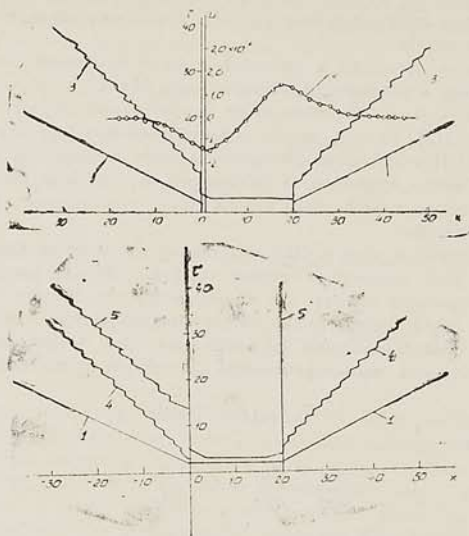


Рис. 1. 1—фронт волны сжатия; 2—перемещения;

$\varepsilon_0 = 10^{-2}(1 - \exp(-mz)) \left(1 + \cos \frac{\pi}{2} \frac{2x - b - vt}{b + vt} \right)$; $b = 20$; $v = 0.05$; $x = 10 - 2$; $x' = 10 - 3$; $a - m = 0.02$; $\delta - m = 0.2$; 3, 4—развитие трещины при $[\sigma] = 4 \cdot 10^{-4}$; 5—то же при $[\sigma] = 4.6 \cdot 10^{-3}$.

ются волны сжатия со скоростью звука для среды. При больших $[\sigma]$ «трещина» не возникает. При меньшем $[\sigma]$, симметричном ε_0 , и $v \ll a$ возникает и распространяется «трещина» в обе стороны от возмущенного участка (кривые 3, 4). При несимметричном ε_0 и сдвиге возмущенной области со скоростью $v < a$ есть случаи, когда «трещина» развивается только в одну сторону от возмущенной области (кривая 5). Причем «трещина» или не распространяется, или развивается с постоянной, меньшей чем скорость упругой волны ($\approx \frac{a}{2}$), скоростью.

Распространение «трещины» в одну сторону показывает, что внутренние неоднородности и несимметричность формы и положения возмущенной области могут привести к наблюдению несимметричной общей картины развития магистральной трещины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский И. П., Зубков С. И., Мячкин В. И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений.—Сб.: Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, 1980, с. 7—44.

2. Гзовский М. В. Основы тектонофизики.—М.: Наука, 1975. 536 с.
3. Григорян С. С. О предсказании землетрясений.—ДАН СССР, 1989, т. 306, №5, с. 1083—1087.
4. Быковцев А. С., Черепанов Г. П. Об одной модели очага тектонического землетрясения.—ДАН СССР, 1980, т. 251, № 6.
5. Пономарев А. С. Теплогазодинамическая модель коровых землетрясений.—Изв. АН СССР, физика Земли, 1990, № 10, с. 100—112.
6. Физические основания поисков методов прогноза землетрясений.—М.: Наука, 1970, 151 с.
7. Добровольский И. П. Механика подготовки тектонического землетрясения.—М.: Институт Физики Земли АН СССР, 1984. 188 с.
8. Хачикян А. С. О проблеме прогноза тектонических землетрясений.—ДАН АрмССР, 1991, т. 92, № 5, с. 201—205.
9. Хачикян А. С., Тоноян В. С., Мкртчян М. С. О предвестниках тектонических коровых землетрясений.—Изв. АН АрмССР, Механика, 1991, т. 44, № 5.
10. Рикитакс. Предсказание землетрясений.—М.: Мир, 1979. 388 с.
11. Григорян С. С. О механизме возникновения землетрясений и содержании эмпирических закономерностей сейсмологии.—ДАН СССР, 1988, т. 299, №5, с. 1094—1101.
12. Костров Б. В. Механика очага тектонического землетрясения.—М.: Наука, 1975. 176 с.

Институт механики
НАН Армении

Поступила в редакцию
14.07.1993