

$$П(x, t) = \int \int_{\Omega} \int_0^t f(\xi, \tau) K(x, t, \xi, \tau) k d\omega d\tau \quad (11)$$

где $K(x, t, \xi, \tau)$ — функция влияния (функция Грина) применительно к каждому предвестниковому явлению и к каждой гипотезе о физике ПП.

Даже неполное описание предложенных гипотез и их модификаций о ПП говорит об их большом количестве и многообразии. Количество и многообразие по их физической сущности наблюдаемых предвестников еще больше. Поэтому, как отмечено в [3], при построении модели и количественного описания ПП возникает необходимость построения многих сотен функционалов типа [1], что нецелесообразно по многим причинам. Особенно важно, что при этом не существует надежной базы для сравнения результатов, полученных согласно расчетам по разным гипотезам. Преодоление (уменьшение) этих трудностей и составляет цель настоящей работы.

2. Приведем краткое описание некоторых наиболее известных гипотез о ПП, особо выделяя те происходящие, по мнению авторов гипотез, процессы, которые могут быть связаны с возникновением наблюдаемых предвестников.

2.1. Гипотеза лавинно-неустойчивого трещинообразования (АНТ) [4]. Согласно представлениям авторов, очаг — сдвиговой разрыв, подготавливается развитием и взаимодействием большого числа сдвиговых трещин.

На первой стадии происходит однородное растрескивание по большому объему. Трещины далеки друг от друга. Среда статистически однородна. Имеет место внешнее однородное нагружение. Для больших магнитуд (M) процесс длится сотни или тысячи лет.

На второй стадии имеет место лавинное взаимодействие трещин. При достижении критической плотности разрывов взаимодействие трещин лавинно ускоряется. Поле напряжений неоднородно. Развивается сильнее только часть трещин согласно полям напряжений. Процесс может длиться десятки лет.

Третья стадия считается авторами стадией неустойчивости. Увеличение деформаций приводит к падению напряжений. Вследствие неоднородности свойств среды деформации стягиваются в узкую полосу (зону), где развиваются несколько крупных трещин. В остальной части трещины не развиваются (закрепляют). В узкой зоне большая плотность разрывов приводит к образованию магистрального разрыва. Время стадии не уточняется, однако ясно, что оно отождествляется со временем возможных форшоков — порядка одного года.

Из описания ясно, что причинами зарождения предвестников могут быть деформации (ϵ_p) и трещинообразование (C_{cr}). В научной литературе именно с деформациями и трещинообразованием связывается появление почти всех предвестников. В первой стадии предвестники могут появляться в виде общего однородного тренда. Во второй стадии появление предвестников должно усиливаться и иметь неоднородный характер. В третьей же стадии появление предвестников должно выражать стягивание процессов в узкую очаговую зону.

2.2. Дилатантно-диффузионная модель землетрясения (ДД) [5].

Представления об очаге по этой гипотезе совпадают с представлениями модели АНТ. На первой длительной стадии происходит рост

упругих напряжений, особо касательных ($\sigma_1 - \sigma_3$), среда не меняется. На второй стадии из-за больших напряжений ($\sigma_1 - \sigma_3$) возникают трещины отрыва. Имеет место объемная деформация — дилатансия. Поровое давление падает, идет осушение пород, прочность пород возрастает.

На третьей, диффузионной стадии вследствие падения порового давления вызывается диффузия воды в зону подготовки. Поровое давление увеличивается, прочность пород падает. Процесс заканчивается магистральным разрывом.

Представления этой гипотезы приведут, с точки зрения причин образования предвестников, к аналогичной гипотезе ЛНТ результатам. Разница состоит в предположении об изменении флюидного режима, что может выражаться в вариациях электрического сопротивления пород и отношения скоростей продольных и поперечных волн.

2.3. Модель консолидации [6]. Согласно представлениям автора в конце длительного, регулярного состояния вследствие движения иерархической системы блоков происходит консолидация в некоторой очаговой зоне. В консолидированной области увеличивается жесткость среды. При критическом увеличении напряжений начинается распад — разрушение.

Таким образом, по представлениям модели длительный процесс затихья заменяется образованием зоны концентрации напряжений — прообраза будущего очага землетрясения. Постепенное увеличение напряжений — деформаций приводит сначала к частичному, потом и к катастрофическому разрушению. Причиной предвестников являются деформации и частичные разрушения, концентрированные в консолидированной зоне.

2.4 Модель упругой отдачи Рейда [2]. По известной теории Рейда, в несколько свободном изложении, вследствие действия внешних сил плиты земной коры движутся и сцепляются. В местах сцепления, препятствий или отличий жесткости пород растет напряжение, накапливается потенциальная (упругая) энергия. По исчерпанию запаса прочности пород происходит разрушение — землетрясение. После землетрясения плиты возвращаются в менее напряженное состояние.

Причинами предвестников здесь могут быть усмотрены деформации (ϵ_y), постепенно концентрирующиеся в очаговой области. Всегда можно предполагать, что деформации сопровождаются мелкими разрушениями — трещинами.

В эту схему, с небольшими изменениями можно включить многие модели: Лобковского Л.И. [7], скачкообразного движения [8], Мишина С.В. [9] и др.

Сюда же можно было бы включить и модель консолидации, которая была рассмотрена отдельно ввиду ее более подробной разработанности.

2.5. Модель подготовки землетрясения Уломова В.И. [10]. По представлениям Уломова В.И. первый этап подготовки землетрясения протекает в виде длительных упруго-пластических деформаций, сопровождающихся уплотнением большого объема (закрывание пор, трещин, деформация менее твердых включений). На втором этапе происходит относительно быстрая упругая деформация с уменьшением объема. На третьем этапе происходит пластическая деформация без изменения объема, которая завершается резким сдвиговым перемещением — землетрясением. К четвертому этапу автор относит процессы релаксации напряжений.

Причинами предвестниковых явлений в этом случае могут быть на первом, длительном этапе упруго-пластические деформации (ϵ') , закрытие пор и трещин (C_c) , неоднородные по большому объему деформации $(\epsilon_g(t, x))$ вследствие деформации менее твердых включений. На втором этапе эту роль выполняет упругое уменьшение объема (ϵ_-) . На третьем, завершающем этапе процесс характеризуется пластическими деформациями (ϵ_g^p) .

2.6. Теплогазодинамические модели подготовки землетрясений. В эту группу, несмотря на значительные отличия, можно включить модель Осика А.Г. [11] импульсивного газового дыхания Земли, модель Ризниченко Ю.В. [12] и теплогазодинамическую модель Пономарева А.С. [13].

По представлениям этих авторов образуются зоны повышенных напряжений (давлений) от вертикального движения земной коры и астеносферы или от проникновения в верхние слои коры флюидов повышенного давления и температуры от нижних слоев. Происходит расширение зоны повышенного давления, растут напряжения и при исчерпании запаса прочности окружающих зону пород происходит разрушение - землетрясение.

Предвестники в этих случаях могут образоваться вследствие деформаций (ϵ_-) , повышения температуры и давления, мелких разрушений при расширении зоны высокого давления (C_c) , изменений флюидного режима (1).

2.7. Модели, предполагающие фазовые или полиморфные превращения [14]. Эти процессы могут быть как основными, так и сопутствующими другим процессам подготовки. При фазовых или полиморфных превращениях породы претерпевают объемные деформации (ϵ_+) . Этапы и скорости всего процесса подробно не описаны, предполагается изменение температуры и давления. Основной причиной образования предвестников в этом случае могут быть деформации.

3. Анализируя описанные выше гипотезы, можно заметить много общего между ними. Все они на первом, длительном этапе (до 10^4 лет) подготовки предполагают медленное нарастание деформаций — однородных или неоднородных, упругих или пластических, сопровождающиеся трещинообразованием или без этого. На втором этапе предполагается концентрация происходящих процессов в относительно небольшой области — очаге будущего землетрясения. Нарастание процессов приводит к разрушению. В некоторых гипотезах считаются принципиальными изменения в флюидном режиме пород, или других процессов, например, фазовых превращений. Описанные по разным гипотезам ход процессов подготовки землетрясения представим в виде таблицы 1.

Отвлекаясь от подробностей типа рода деформаций, отличия предполагаемых изменений флюидного режима и других, можно построить объединенную таблицу 2.

Таким образом, приходим к следующему общему, феноменологическому описанию процессов подготовки землетрясений.

На первом, длительном (сотни и более лет) этапе подготовки происходит однородное деформирование в большом объеме с возможным сопровождением однородного же трещинообразования. На втором, относительно коротком этапе (десятки лет), кроме того, возможно неоднородное изменение флюидного режима. На третьем этапе (от года до первых нескольких десятков лет) происходит усиление этих процессов непосредственно в очаговой зоне, что и в конечном итоге может привести к неустойчивости — образованию магистрального разрыва, землетрясения.

Таблица 1

Время до события (годы)	10^3	10^2	10^1	10^0	10^{-1}
АНТ	$\varepsilon_{ij}(t), C_{cr}(t)$		$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$		$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$
ДЛ	$\varepsilon_{ij}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x), L(t)$		$\varepsilon_{ij}(t, x)$	
Консолидации	$\varepsilon_{ij}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$		$\varepsilon_{ij}(t, x)$
Рейд и др.	$\varepsilon_{ij}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$		$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$	
Удомов	$\varepsilon_{ij}^p(t)$		$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon^p(t, x)$	
Гендогаз. модели	$\varepsilon_{ij}(t), \varepsilon_{ij}(t)$		$\varepsilon_{ij}(t, x), \varepsilon_{ij}(t, x), L(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x), L(t, x)$	
Фазовые превр.	$\varepsilon_{ij}(t)$		$\varepsilon_{ij}(t, x)$		$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$

Таблица 2

Время до события (годы)	10^3	10^2	10^1	10^0	10^{-1}
Процессы подготовки	$\varepsilon_{ij}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$		$\varepsilon_{ij}(t, x)$	
	$C_{cr}(t)$	$C_{cr}(t, x)$		$C_{cr}(t, x)$	
		$L(t, x)$		$L(t, x)$	

Согласно этому описанию основными предвестникообразующими факторами являются деформации, трещинообразование и изменение флюидного режима пород.

Хотя представления исследователей о механизмах образования предвестников очень разнообразны, большинство из них с деформациями связывают всю гамму предвестников, от геохимических до электромагнитных. С трещинообразованием связываются обычно (кроме деформаций) звуковые и электромагнитные эмиссии, а также изменения электропроводности пород. Влияние изменений флюидного режима усматривается, в основном, на геохимические предвестники, теллурические токи, изменения скорости распространения волн.

1. Возвращаясь к функциональной связи [1], согласно выводам предыдущего пункта мы видим, что интенсивность $f(x, t)$ можно представить в виде трехмерного вектора. Компонентами этого вектора являются деформации, трещинообразование и вариации флюидного режима. Не касаясь здесь вопроса описания этих компонентов, отметим, что деформации являются тензорами второго ранга и поэтому запись (1) нужно воспринимать как чисто символическую. Приведенные ниже частные примеры иллюстрируют реальные формы функциональной связи (1).

4.1. Модель консолидации [6]. Эта модель является количественно наиболее разработанной. Для перемещений земной поверхности автором модели выведена формула

$$W = -\alpha \tau \iiint (v_{1,2}' + v_{2,1}') / v_3' \quad (2)$$

где α — относительное изменение модуля сдвига по основному предположению модели, τ — напряжение на бесконечности, v_{ij}' — функции Грина.

Исходя из формулы (2), с единых позиций исследованы перемещения поверхности земли и наклоны по глубине как предвестники. Поставлена и решена одна обратная задача сейсмического просвечивания для конкретного землетрясения. Знаменательно определение изменений вектора магнитной индукции. Кратко изложим ее суть.

Известно [15], что горные породы обладают некоторой начальной намагниченностью и свойством пьезомагнетизма. Вследствие этого происходящие деформации во время подготовки землетрясений приводят к изменению намагниченности пород. Это обнаруживается на поверхности Земли в виде изменения вектора магнитной индукции, рассматриваемое как предвестник.

Принимая закон пьезомагнетизма

$$\Delta \bar{I}_i = -\frac{3}{2} C \bar{I}_i S_{ij}$$

где C — пьезомагнитный коэффициент пород, $\bar{I}$ — вектор намагниченности, S_{ij} — девиатор деформаций, в [6] выведено приближенное соотношение

$$\Delta \bar{B} = \nabla \times \iiint \frac{\Delta \bar{I} \times \bar{R}}{R^3} dV$$

Здесь $\bar{B}$ — вектор магнитной индукции, ∇ — набла-оператор, R — расстояние наблюдаемой точки от элемента объема, где происходит процесс подготовки.

Это соотношение позволило в рамках модели консолидации произвести вычисления изменений вектора магнитной индукции и сравнивать их с действительно наблюдаемыми данными.

4.2. Модель дополнительной деформации. Для случая статических объемных деформаций в [16] для перемещений полупространства получено

$$\begin{aligned} U_x &= A \int_{\Omega} (x - \alpha) \left[R_1^{-3} + (3 - 4\nu) R_2^{-3} - 6z(z + \gamma) R_2^{-5} \right] \varepsilon_0 d\omega \\ U_y &= A \int_{\Omega} (y - \beta) \left[R_1^{-3} + (3 - 4\nu) R_2^{-3} - 6z(z + \gamma) R_2^{-5} \right] \varepsilon_0 d\omega \\ U_z &= A \int_{\Omega} \left[(z - \gamma) R_1^{-3} - (3 - 4\nu)(z + \gamma) R_2^{-3} - 6z(z + \gamma)^2 R_2^{-5} + 2R_2^{-3} \right] \varepsilon_0 d\omega \end{aligned} \quad (3)$$

где $A = \frac{1 + \nu}{4\pi(1 - \nu)}$, $R_{1,2} = \left[(x - \alpha)^2 + (y - \beta)^2 + (z \mp \gamma)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, $d\omega = d\alpha d\beta d\gamma$.

ν — коэффициент Пуассона.

Там же приведены примеры вычислений перемещений по формулам (3) для дневной поверхности ($z = 0$), при $\varepsilon_0 = \text{const}$ в заданной области.

На основании этих уравнений сделаны вычисления деформаций земной поверхности. Далее, принимая определенные простые формы активной области, получены упрощенные уравнения относительно конечного числа неизвестных — характеристик очаговой области. Сформирована обратная задача и сделан анализ одного частного решения [17].

Более подробное ознакомление с приведенными примерами, особенно хорошо разработанной моделью консолидации, показывает, насколько плодотворно определение полей деформаций при анализе гипотез процессов подготовки землетрясений.

Обобщая вышеизложенное, можно констатировать, что подавляющее большинство наиболее известных гипотез о физических процессах подготовки землетрясений допускает феноменологическое описание функциональным соотношением (1) физических процессов и их связи с наблюдаемыми предвестниками с представлением всех процессов в виде некоторых деформаций. Таким образом, феноменологическая модель подготовки землетрясений, основанная на функционале (1), имеет достаточную широту охвата идей. Примеры постановки и решения в рамках этой модели, прямой (определение величин предвестников при известном месте и интенсивности процессов подготовки) и обратной (определение места и интенсивности процессов подготовки при известных величинах предвестников) задач приведены в [3, 6, 17]. Очевидна также принципиальная возможность осуществления физической экспериментальной модели на этой основе.

Концепция предложенной модели также созвучна с нарастающей ролью механики сплошной среды в исследованиях землетрясений и других проблем геофизики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М.: Мир, 1979. 388 с.
2. Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985. 264 с.
3. Хачикян А.С., Мкртчян М.С. Определение активной области подготовки землетрясений // Изв. НАН Армении. Механика. 1995., Т.48, №1. С. 16-23.
4. Мячкин В.И. Процессы подготовки землетрясений. М.: Наука, 1978. 232 с.
5. Sholz C.H., Sykes I.R., Aggarwal Y.P. Earthquake Prediction: a Physical Basis. Science. 1973. V. 181, N 4102. P. 803-810.
6. Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. Институт физики Земли АН СССР, М.: Наука, 1984. 189 с.
7. Лобковский А.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции. М.: Наука, 1988. 251 с.
8. Nur A. Nonuniform Friction as a Physical Basis for Earthquake Mechanics. a Review. // In: Proc. of Conference 2 Experimental Studies of Rock Friction Prediction. Menlo Park, California, 1977, p. 241.
9. Мишин С.В. Модель процесса землетрясения. // В кн.: Физические процессы в очагах землетрясений. М.: Наука, 1980, 166с.
10. Уломов В.И., Мавашев Б.З. О предвестнике сильного тектонического землетрясения. // Докл. АН СССР, 1967. Т. 176. № 2. С. 319-321.
11. Осица Д.Г. О некоторых теоретических и практических следствиях изучения генетической сущности геохимических и гидрогеологических процессов в связи с сейсмичностью недр. // В кн.: Геодинамика и сейсмичность территории Дагестана, № 3 (21). Махачкала: ФАН. 1979. 97с.
12. Ризвиченко Ю.В. Энергетическая модель сейсмического режима. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1968, № 5, С. 3-19.
13. Пономарев А.С. Теплогазодинамическая модель коровых землетрясений // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 10. С. 100-112.
14. Калинин В.А. и др. Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989. 157 с.
15. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
16. Хачикян А.С. О проблеме прогноза тектонических землетрясений. // Докл. АН Армении. 1991. Т. 92. № 5. С. 201-205.
17. Хачикян А.С., Казарян А.С. Об обратной задаче подготовки землетрясений. // Тр. конференции, посвященной 90-летию академика А.Г. Назарова, 1-4 июня. 1998, Гюмри. С. 314-318.

Институт механики
НАН Армении

Поступила в редакцию
14.12.2001