

УДК 550.341

Օ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ
ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Хачикян А.С.

Ա. Ս. Խաչիկյան

Երկրաշարժի նախապատրաստության ֆենոմենոլոգիական մոդելների մասին

Երկրաշարժի առաջացման մասին գոյություն ունեցող տեսությունների և վարկածների քննարկման հիման վրա ներկայացված է երկրաշարժի նախապատրաստության սրտցեսի ֆենոմենոլոգիական մոդել: Չնայած նեոազոտողները շուրջն միասնական կարծիք երկրաշարժի առաջացման ֆիզիկայի, շարժի, ուժերի, նախապատրաստության գործընթացի դինամիկայի և փուլերի վերաբերյալ, կատարված անալիզը ցույց է տալիս, որ առաջարկվող վարկածները ունեն քաղաքականացի ընդհանուր հիմնական հատկություններ մեկ միասնական ֆենոմենոլոգիական մոդելով նկարագրելու համար: Երկրաշարժի մոդելում որպես բնութագրական հատկություն ընդունված է նախապատրաստության սրտցեսում դեֆորմացիայի աճի և դեֆորմացիայի խտացման տեղանակների (երկրաշարժի ալիազա օջախի) առկայության գաղափարը:

Քննարկված են տարրեր ֆիզիկական բնույթի կանխանշանների առաջացման հնարավոր մեխանիզմները և նշված են դիտարկվող վարկածում սարսփող կանխանշանները նախապատրաստության յուրաքանչյուր փուլում: Առաջարկվող մոդելի ընձեռնած հնարավորությունները և հետագա զարգացման ուղղությունները ցուցադրված են օրինակներով:

A. S. Khachikyan

On Phenomenological models for earthquakes preparations

На основании анализа существующих теорий и гипотез о возникновении землетрясений представлена феноменологическая модель процесса подготовки землетрясений. Хотя нет единого мнения исследователей о физике, движущих силах, динамике и этапах процесса подготовки землетрясений проведенный анализ показывает, что известные гипотезы обладают достаточно общими характерными чертами для их описания в рамках единой феноменологической модели. Предложенная модель основана на содержащемся во всех гипотезах предположении о росте деформаций и образовании участков концентрации деформаций (прообраза будущего очага землетрясения) в процессе подготовки землетрясений. Обсуждены возможные механизмы возникновения предвестников разной физической природы и отмечены предвестники, ожидаемые на каждом этапе подготовки. Направление дальнейшего развития и открываемые модели возможности иллюстрированы на примерах.

Процессы подготовки (ПП) землетрясений обсуждены многими исследователями в их связи с возможным прогнозом землетрясений при помощи наблюдаемых предвестников [1,2]. Высказаны разные идеи о сущности физических процессов, происходящих при подготовке землетрясений и их связи с наблюдаемыми при этом вблизи поверхности земли явлениями - предвестниками. Здесь делается попытка обобщенного феноменологического описания этих процессов.

1. Предположим что в некоторой области Ω земной коры протекает ПП, интенсивность которого можно описать функцией $f(x,t)$. Вследствие этого в любой точке земной коры, а также вблизи ее поверхности меняется значение параметра (характеристики) наблюдаемого физического поля $P(x,t)$, который принято называть предвестником. Очевидно, что нам желательно иметь функциональную связь [3]

$$\Pi(x, t) = \int_{\Omega_0} \int_0^t f(\xi, \tau) K(x, t, \xi, \tau) d\omega d\tau \quad (1)$$

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 (заживают). 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_{ij}) 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

Причинами предвестниковых явлений в этом случае могут быть на первом, длительном этапе упруго-пластические деформации (ε_{ij}^p), закрытие пор и трещин (C_{cr}), неоднородные по большому объему деформации ($\varepsilon_{ij}(t, x)$) вследствие деформации менее твердых включений. На втором этапе эту роль выполняет упругое уменьшение объема (ε_{ij}). На третьем, завершающем этапе процесс характеризуется пластическими деформациями (ε_{ij}^p).

2.6. Теплогазодинамические модели подготовки землетрясений. В эту группу, несмотря на значительные отличия, можно включить модель Осика Д.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_{ij}), повышения температуры и давления, мелких разрушений при расширении зоны высокого давления (C_{cr}), изменений флюидного режима (L).

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_{ij}). 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 10^3 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	$\varepsilon_{ij}(t), C_{cr}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$
ДД	$\varepsilon_{ij}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x), L(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$
Консолидации	$\varepsilon_{ij}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$
Рейд и др.	$\varepsilon_{ij}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), C_{cr}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$
Уломов	$\varepsilon_{ij}^p(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$	$\varepsilon^p(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x)$
Теплогаз. модели	$\varepsilon_{ij}(t), \varepsilon_{ii}(t)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), \varepsilon_{ii}(t, x), L(t, x)$	$\varepsilon_{ij}(t, x), L(t, x)$	$\varepsilon_{ii}(t, x), C_{cr}(t, x), L(t, x)$	$\varepsilon_{ii}(t, x)$
Фазовые превр.	$\varepsilon_{ii}(t)$	$\varepsilon_{ii}(t, x)$	$\varepsilon_{ii}(t, x)$	$\varepsilon_{ii}(t, x), C_{cr}(t, x)$	$\varepsilon_{ii}(t, x)$

Таблица 2

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

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.

4. 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

$$W = -\alpha\tau \iiint_V (v'_{1,2} + v'_{2,1}) dv_\xi \quad (2)$$

где α — относительное изменение модуля сдвига по основному предположению модели, τ — напряжение на бесконечности, $v'_{i,j}$ — 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

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

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

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

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 L.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 Л.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. Осика 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 Л.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