

I. G. Kissin, On relations between earthquake precursors and postseismic effects,
Dokl. Akad. Nauk, 1997, Volume 354, Number 6, 804–807

<https://www.mathnet.ru/eng/dan50359>

Use of the all-Russian mathematical portal Math-Net.Ru implies that you have read and agreed to these terms of use

<https://www.mathnet.ru/eng/agreement>

Download details:

IP: 18.97.9.168

May 17, 2025, 15:39:28



УДК 550.343

О СООТНОШЕНИЯХ МЕЖДУ ПРЕДВЕСТНИКАМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПОСТСЕЙСМИЧЕСКИМИ ЭФФЕКТАМИ

© 1997 г. И. Г. Киссин

Представлено академиком В. Н. Страховым 12.04.96 г.

Поступило 17.04.96 г.

Постсейсмические эффекты отражают развитие связанных с землетрясениями деформационных процессов в земной коре не только в эпицентральных зонах, но и на больших (телесеismicких) расстояниях. Проявления постсейсмических эффектов, их пространственно-временное распределение важны для понимания особенностей сейсмического цикла в различных регионах. Однако эти эффекты по тем или иным геофизическим полям не привлекли пока должного внимания при проведении сейсмопрогностических исследований. Исключения составляют лишь афтершоки сильных землетрясений и некоторые другие показатели сейсмического режима.

Для изучения постсейсмических эффектов и их соотношений с эффектами-предвестниками предпочтительнее было бы привлечь данные деформационных измерений. Но такие данные сравнительно малочисленны, и эти измерения редко проводятся в асейсмичных областях. Поэтому мы использовали преимущественно материалы гидрогеодинамических наблюдений, главным образом за вариациями уровня подземных вод. В этих вариациях при надлежащей обработке может быть выделена деформационная составляющая [1]. Имеется довольно большое количество данных по гидрогеодинамическим эффектам не только по сейсмопрогностическим сетям, но и по многим объектам в асейсмичных областях. Недостатком таких эффектов является то, что они нередко обнаруживают нелинейную зависимость от деформаций. Впрочем, этот недостаток имеют все иные показатели, кроме собственно деформационных, а для гидрогеодинамических эффектов он в ряде случаев может быть устранен [1].

Рассмотрим различные фазы изменений гидрогеодинамических эффектов в зависимости от деформаций, развивающихся в верхних частях земной коры на протяжении сейсмического цикла. Можно считать, что эти изменения присущи

не только гидрогеодинамическим, но и иным эффектам, которые формируются под влиянием деформаций.

1) Фаза сейсмического покоя. В этот период эффекты, вызванные подготовкой определенного землетрясения, не проявляются, однако могут быть зарегистрированы эффекты, которые обусловлены геодинамическими процессами, связанными с сейсмическим режимом территории, например, прохождением деформационных волн, криповыми подвижками и др.

2) Фаза подготовки землетрясения. В этой фазе регистрируются эффекты-предвестники.

3) Косейсмическая фаза. Ее продолжительность соответствует периоду излучения сейсмических волн, под влиянием которых образуются гидрогеодинамические и иные эффекты.

4) Постсейсмическая фаза. Эффекты в этот период формируются под действием упругих и неупругих деформаций, связанных с землетрясением.

Эффекты-предвестники, как гидрогеодинамические, так и регистрируемые по другим полям, имеют различную форму сигнала. По большинству полей чаще всего встречаются бухтообразные кривые. В графиках гидрогеодинамических предвестников также преобладает форма бухтообразной депрессии, на втором месте ступенчатые снижения или повышения уровня подземных вод [2].

Среди сигналов-предвестников особый интерес представляют кривые с экстремумом (рис. 1). Экстремум кривой следует связывать с изменением знака или скорости деформации. В ступенчатой кривой, не имеющей экстремума, характерной точкой является прекращение наклона (выполаживание), что свидетельствует об изменении скорости деформации. Это справедливо для всех деформационных предвестников и в большинстве случаев (с учетом условий фильтрации) для предвестников гидрогеодинамических. Такие характерные точки на кривых можно рассматривать как наступление новой стадии в процессе подготовки землетрясения.

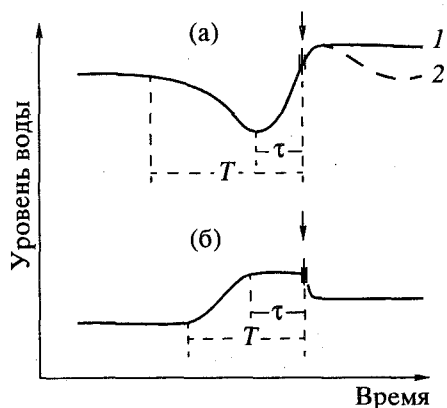


Рис. 1. Некоторые типичные формы кривых гидрогеодинамических эффектов в фазах подготовки землетрясения и постсейсмической. Кривые предвестника: а – бухтообразная, б – ступенчатая. Стрелка – момент землетрясения, T – время предвестника, τ – время экстремума (перегиба кривой) предвестника. Постсейсмические эффекты: 1 – остаточный, 2 – обратимый.

Время экстремума (период от регистрации экстремума до момента землетрясения) может служить прогнозным признаком. Соотношение между временем экстремума τ и временем предвестника T определяется уравнением

$$\lg \tau = a \lg T - b.$$

Параметры этого уравнения для гидрогеодинамических предвестников: по мировым данным $a = 0.90$, $b = 0.25$, коэффициент корреляции $K = 0.71$ [2]; по данным наблюдений в регионах бывшего СССР $a = 0.83$, $b = 0.20$, $K = 0.94$, в регионах Китая $a = 0.69$, $b = 0.19$, $K = 0.46$ [3]. По наблюдениям в бывшем СССР и Китае более чем для половины гидрогеодинамических предвестников время экстремума составляло от 0 до 10 сут, а почти для 70% – от 0 до 20 сут (рис. 2). Поэтому после регистрации точки экстремума или перегиба ступенчатой кривой можно с довольно большой долей

вероятности определить время ожидаемого землетрясения.

В косейсмической фазе применительно к гидрогеодинамическим эффектам различают два вида реакции системы скважина–пласт на прохождение волн – динамическую и статическую [4]. Динамическая реакция происходит при воздействии сейсмических волн, особенно волн Релея, вызывающих флуктуации объема порово-трещинного пространства пород и, следовательно, давления воды. Система скважина–пласт при этом рассматривается как простой гармонический осциллятор [5]. В условиях напорного пласта такая система служит гидравлическим сейсмографом [6]. Косейсмические колебания уровня подземных вод неоднократно регистрировались на больших расстояниях от эпицентров сильных землетрясений (многие тысячи километров), причем в некоторых скважинах они отсутствовали. Статическая реакция системы выражена повышением или снижением уровня подземных вод при прохождении волн. Такие изменения уровня могут быть более или менее длительными или необратимыми, т.е. переходят в постсейсмическую фазу. Поэтому мы их рассмотрим совместно с постсейсмическими эффектами.

Постсейсмические эффекты разнообразны по своим характеристикам и распределению в пространстве и времени. Следует выделить три типа постсейсмических эффектов применительно к различным геофизическим, а также гидрогеодинамическому и гидрогеохимическому полям:

I – эффекты, которые появились в результате образования магистрального разрыва и сопутствующих ему деформаций в очаге землетрясения и прилегающих к нему участках;

II – эффекты, обусловленные деформациями на контактах блоков различных порядков в процессе релаксации или перестройки поля напряжений–деформаций после землетрясения;

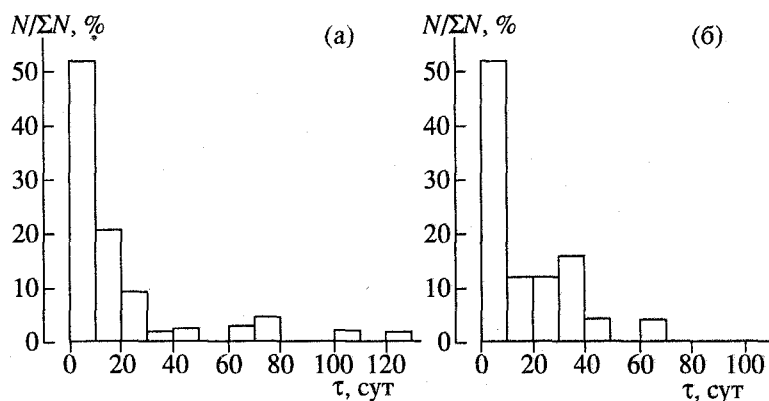


Рис. 2. Распределение гидрогеодинамических предвестников землетрясений в регионах Китая (а) и бывшего Советского Союза (б) по времени экстремума предвестника [3].

III – эффекты, образовавшиеся после прохождения сейсмических волн, вызванных землетрясением, в районах за пределами зоны перестройки поля напряжений–деформаций или на телесеismicких расстояниях.

Такая классификация постсейсмических эффектов выполнена с учетом выделения трех типов эффектов-предвестников [7, 8], однако постсейсмические эффекты, являясь продолжением предвестников, по механизму формирования существенно отличаются от последних.

Постсейсмические эффекты I типа по гидрогеодинамическому полю хорошо известны. Наряду с другими изменениями режима подземных вод, они фигурируют в шкале интенсивности землетрясений как один из ее показателей.

Эффекты II типа образуются на территории, значительно превышающей размеры области очага землетрясения. Их проявления известны на расстояниях до 500 км и более от эпицентров сильных землетрясений. Интенсивность таких эффектов зависит от движений на контактах между блоками, равновесие которых нарушено землетрясением. На характер этих эффектов влияют также вибро- и тензочувствительности наблюдательных систем [1]. Условия формирования постсейсмических эффектов II типа определяют их мозаичное распределение и отсутствие четкой зависимости от эпицентральных расстояний. Гидрогеологические эффекты II типа наиболее сильно проявляются на месторождениях минеральных вод, которые обычно приурочены к разломным структурам. Например, после землетрясения 24.11.1976 г. с $M = 7.5$ в районе оз. Ван (Турция) на армянском курорте Арзни в 160 км от эпицентра произошли сильные изменения режима минеральных вод – повысился их напор и дебит, в 2–2.5 раза выросла минерализация [9]. Столь значительные изменения не были адекватны слабым сотрясениям (4–5 баллов), которые ощущались в Арзни.

Постсейсмические эффекты III типа регистрировались при сейсмических, деформационных и гидрогеологических измерениях. Ф. Пресс [10] проводил данные об остаточных смещениях на сейсмограммах удаленных сильных землетрясений. Например, при прохождении волн от Аляскинского землетрясения 27.03.1964 г. с $M = 8.4$ сейсмограф на Гавайских островах зарегистрировал смещение, соответствующее деформации 10^{-8} . Была предложена модель, в которой остаточные деформации на больших расстояниях зависят от величины разрыва, образовавшегося при землетрясении, и амплитуды подвижек. Отмечена необходимость дальнейших исследований этого вопроса. В более поздних работах [11 и др.] такие смещения связывают с импульсной волной, сопровождающей поверхностные волны от очень

сильных землетрясений. Указывается, однако, что материалов наблюдений еще недостаточно, и они требуют подтверждения. Аномальные наклоны были зарегистрированы после прихода поверхностных волн от катастрофического Гоби-Алтайского землетрясения 1957 г. приборами в Гарме (Таджикистан) и Симферополе; в последнем аномалии были больше, чем в Гарме [12].

Более многочисленные данные имеются об остаточных смещениях уровня подземных вод, вызванных удаленными сильными землетрясениями. Так, из 711 скважин на территории США (за пределами Аляски), в которых зафиксированы эффекты Аляскинского землетрясения 27.03.1964 г., остаточные изменения уровня воды с амплитудой, составляющей единицы, реже десятки сантиметров, наблюдались на 194 скважинах. При этом в 124 скважинах уровень снижался, а в 70 повышался [13].

Общей причиной остаточных эффектов: сейсмических, деформационных, гидрогеодинамических, регистрируемых на очень больших расстояниях от эпицентров землетрясений, очевидно, служат неупругие деформации, вызванные прохождением сейсмических волн. Надо полагать, что в большинстве случаев такие неупругие деформации образуются при взаимодействии сейсмических волн с полем напряжений, существующим в верхних горизонтах земной коры. При этом величина и знак деформации зависят от параметров поля напряжений, а прохождение волн служит спусковым механизмом, вызывающим разрядку напряжений. Только так можно объяснить неповсеместное распространение и разные знаки остаточных эффектов. Подобный механизм влияния упругих волн на водонасыщенную среду был ранее привлечен для выяснения причин остаточных эффектов, обнаруженных при вибрационных воздействиях на систему скважина–пласт [14]. Такие остаточные эффекты имеют общие черты с рассматриваемыми постсейсмическими эффектами III типа. Предложенный механизм позволяет устранить трудности, которые возникают, если, следуя работе [10], связывать остаточные деформации, регистрируемые на телесеismicких расстояниях, с параметрами разрыва в очаге сильного землетрясения.

Переход от эффектов-предвестников к постсейсмическим эффектам (с учетом кратковременной косейсмической фазы) может иметь различные формы (рис. 1). При наблюдениях по разным полям после землетрясений отмечают изменения знака или градиента вариаций показателей. Некоторые землетрясения не сопровождаются заметным переломом в кривых этих вариаций. Характер перехода от предвестников к постсейсмическим эффектам отражает изменения поля напряжений–деформаций среды после землетрясения и

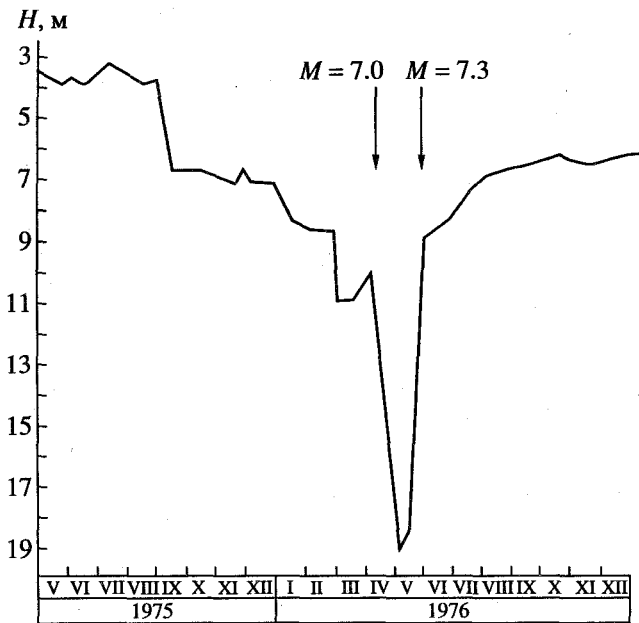


Рис. 3. Изменения уровня подземных вод в скважине 2г Ашхабадского полигона до и после Газлийских землетрясений 1976 г. [15].

зависит также от местных условий на участках наблюдений.

Особенности такого перехода в ряде случаев могут служить критерием при определении вероятности повторных сильных землетрясений или афтершоков. Показательным примером являются данные наблюдений до и после «сдвоенных» Газлийских землетрясений 08.04.1976 г. с $M = 7.0$ и 17.05.1976 г. с $M = 7.3$. В одной из скважин близ Ашхабада, расположенной на расстоянии около 530 км от эпицентров землетрясений, были зафиксированы изменения уровня воды (рис. 3). Резкие переломы кривой уровня отмечены непосредственно перед обоими землетрясениями. После толчка 08.04.1976 г. началось новое интенсивное падение уровня, что указывало на незавершенность деформационного процесса. Вслед за окончанием бухтообразной вариации уровня произошло землетрясение 17.05.1976 г. Таким образом, сразу же после первого землетрясения начал формироваться предвестник второго. Совершенно иной характер имели постсейсмические изменения уровня подземных вод после второго землетрясения, когда наблюдались возрастание уровня и приближение его к фоновым значениям. Эти постсейсмические эффекты Газлийских землетрясений следует отнести к II типу, они отражают перестройку поля напряжений–деформаций на довольно значительном расстоянии от эпицентров

землетрясений, в зоне Главного Копетдагского разлома [9].

В заключение сформулируем некоторые выводы.

В реакции различных полей на подготовку землетрясений могут быть выделены особые, переломные этапы, отражающие переход процесса подготовки в новую, часто заключительную стадию. Продолжительность этой стадии для гидрогеодинамических предвестников в большинстве случаев не превышает 10–20 сут.

Выделены три типа постсейсмических эффектов, различающиеся по зонам проявления и механизму формирования этих эффектов.

Характер перехода от фазы подготовки землетрясения к постсейсмической фазе зависит от степени разрядки напряжений после землетрясения и может служить указанием на последующие рецидивы сейсмической активности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киссин И.Г. // Физика Земли. 1993. № 8. С. 58–69.
2. Kissin I.G., Grinevsky A.O. // Tectonophysics. 1990. V. 178. P. 277–286.
3. Grinevsky A.O., Kissin I.G., Wang Chengmin, Wang Tiecheng // J. Earth. Prediction Res. 1993. V. 2. № 3. P. 349–362.
4. Bredehoeft J.D., Riley F.S., Roeloffs E.A. // Earthquakes and Volcanoes. 1987. V. 19. № 4. P. 138–146.
5. Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopoulos J.S., Bennett R.R. // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 16. P. 3915–3926.
6. Николаевский В.Н., Рамазанов Т.К. // Изв. АН СССР. МЖГ. 1984. № 4. С. 81–86.
7. Киссин И.Г. // Там же. Физика Земли. 1988. № 6. С. 3–13.
8. Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 314 с.
9. Арбузов В.А., Берри И.Л., Казарян С.В. // Тр. ЦНИИ курортологии и физиотерапии. 1979. Т. 39. С. 101–110.
10. Press F. // J. Geophys. Res. 1965. V. 70. № 10. P. 2395–2412.
11. Железняк Т.К. Сейсмические приборы. М.: Наука, 1990. В. 21. С. 127–131.
12. Бончковский В.Ф. // Изв. АН СССР. Серия геофиз. 1962. № 2. С. 190–193.
13. Wohris R.C. Hydrologic effects of the earthquake of March 27, 1964 outside Alaska // Geol. Surv. Prof. Paper № 544-C. 1967. 54 p.
14. Барабанов В.Л., Гриневский А.О., Киссин И.Г., Николаев А.В. // ДАН. 1987. Т. 297. № 1. С. 52–56.
15. Милькис М.Р., Воронин И.В. В сб.: Тез. докл. Всесоюз. научн.-тех. семинара. ВСЕГИНГЕО. М., 1983. С. 15–16.