

УДК 551.240

Академик НАН Армении Р. А. Мовсисян

Геодезический деформационный предвестник землетрясений

(Представлено 23/1 1998)

Как известно, проблема прогноза землетрясений заключается в поисках ответов на три вопроса: где, какой магнитуды и когда произойдет очередной сейсмический толчок.

В работах (1,2) проблему прогноза предлагается разделить на два этапа. На первом необходимо ответить на два вопроса – где и какой магнитуды готовится землетрясение, а на втором, сосредоточив на конкретном участке геологического сейсмогенного разлома различные средства наблюдений за предвестниками, попытаться ответить на третий вопрос.

В качестве прогнозного признака для обнаружения зон возникновения очагов землетрясений в работе (2) предлагается использовать геодезический деформационный предвестник – экспоненциальное искривление горных пород, наглядно описанное в работе новозеландского сейсмолога Дж.Эйби (3) в качестве иллюстрации к теории упругой отдачи Г.Ф.Рейда (4).

В настоящей статье обосновывается возможность установления математической зависимости между характеристиками геодезического предвестника и параметрами будущего землетрясения.

В работе (5) предложена методика геодезического мониторинга вдоль активного разлома, позволяющая разграничить зоны возникновения возможных очагов коровых землетрясений от криповых ползучих смещений литосферных блоков, для чего предложено использовать сравнительно простые геодезические построения в виде четырехугольников со сторонами не более 1 км. На рис.1,а четырехугольники №1 и 2 находятся в зоне криповых смещений сейсмогенных блоков I и II, движущихся в противоположных направлениях со скоростью U_0 см/год. Эта скорость определяется путем повторного измерения длин диагоналей четырехугольников.

Четырехугольники №3 – 5 находятся в зоне зацепления блоков I и II на длине L разлома. Диагонали и стороны четырехугольников, находящиеся вблизи от поверхности S зацепления блоков, в процессе мониторинга не меняют свою длину в пределах точности линейных измерений, которая оценивается относительной средней квадратической ошибкой, близкой к $1 \cdot 10^{-6}$.

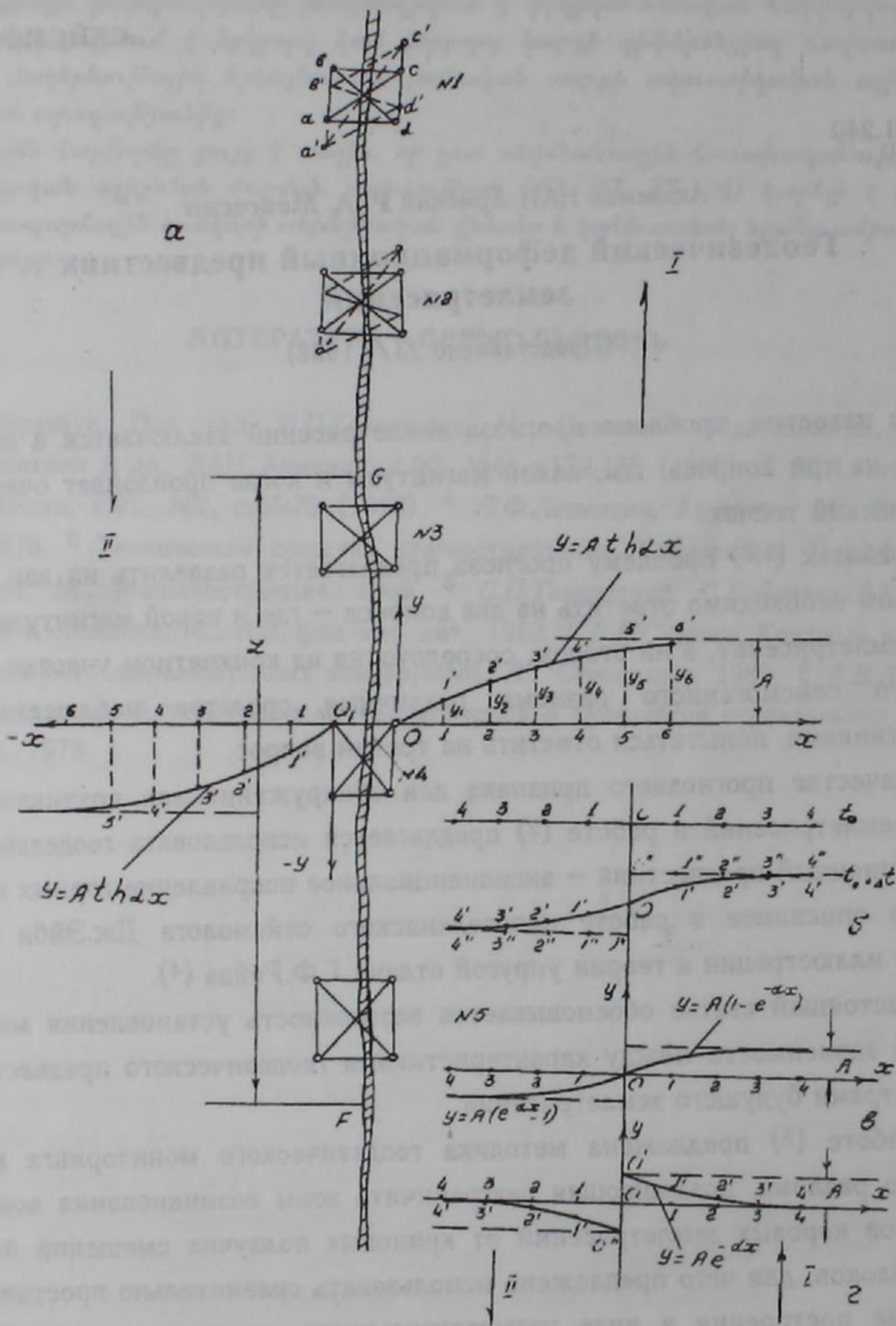


Рис.1

Для выявления характера деформационного процесса, происходящего в зоне L в поперечном к разлому направлении в средней части участка, где расположен четырехугольник №4, закрепляются в момент времени t_0 в одной

вертикальной плоскости, проходящей, например, через сторону O_1O четырехугольника, точки 1, 2, 3 ... 6 на расстоянии около 500 м друг от друга. Как видно из рис.1, направление O_1O принято за ось абсцисс, а перпендикулярное ему направление вдоль разлома – за ось ординат. Согласно теории Г.Ф.Рейда через некоторое время Δt закрепленные в одной плоскости точки переместятся и займут новое положение в направлении движения блока I – $1', 2', 3' \dots$. То же самое произойдет с точками, расположенными на блоке II. Если мысленно соединить точки $1', 2', 3' \dots$, то получим кривую, которую назовем деформационной. При возрастании абсциссы x ординаты y точек кривой будут экспоненциально приближаться к определенной величине $A_0 \cdot \Delta t$, равной половине смещения $U_0 \cdot \Delta t$ блоков I и II за время Δt . Согласно теории упругой отдачи, механизм подготовки и возникновения корового землетрясения заключается в следующем.

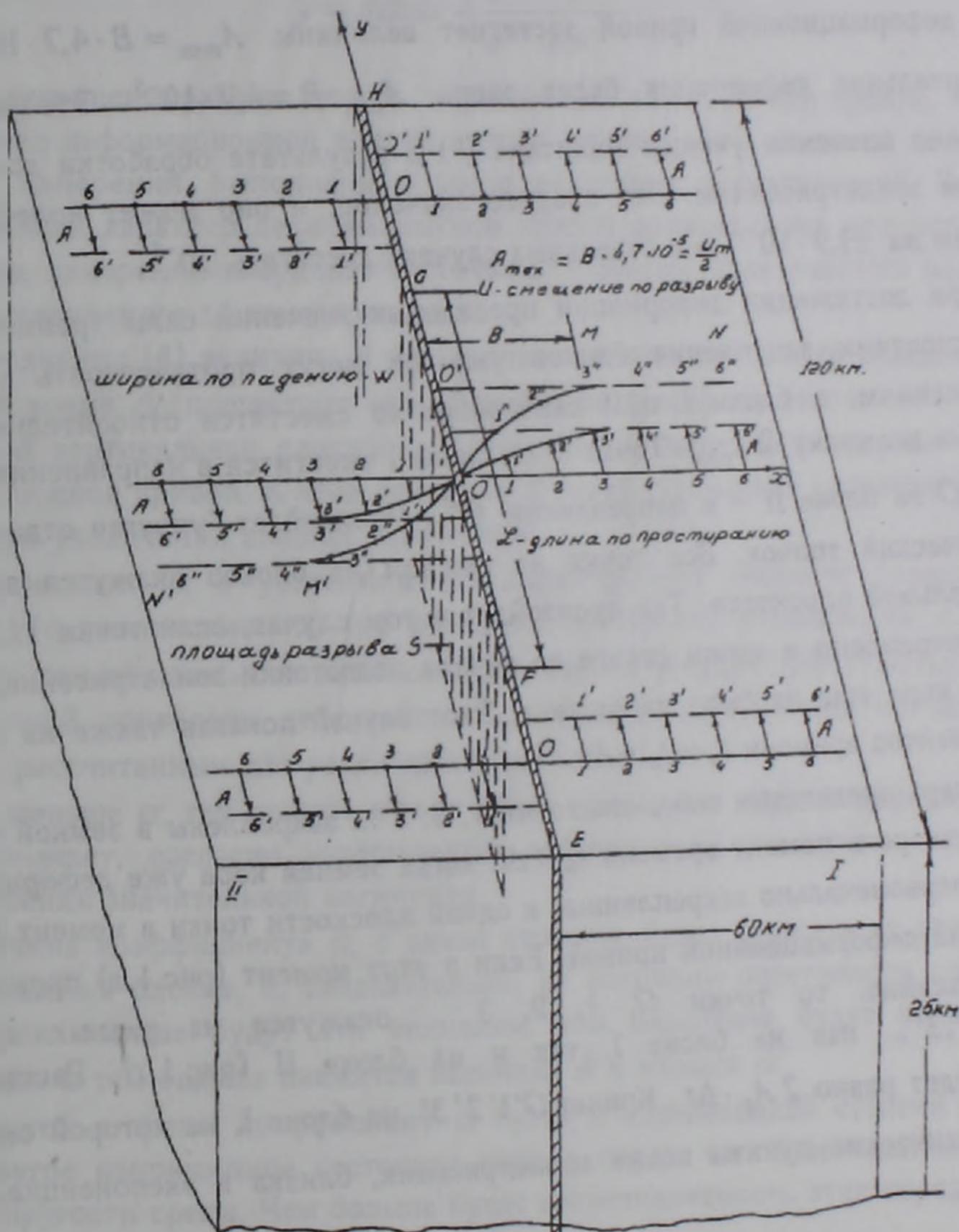


Рис. 2

На участках EF , GH вне длины L зоны зацепления блоков I и II по поверхности S , а также на участках MN и $M'N'$, удаленных от разлома на расстояние, превышающее некоторую величину B , происходят криповые перемещения блоков. При этом на участке EF , GH точки O , 1, 2, 3 ..., закрепленные на различных блоках, смещаются за время Δt относительно друг друга на величину $U_0 \cdot \Delta t = 2 A_0 \cdot \Delta t$, оставаясь на каждом из блоков в одной вертикальной плоскости. Такой же характер будут иметь смещения на участках MN и $M'N'$, удаленных от разлома более величины B .

На участке FG зацепления блоков I и II через год после закрепления точек 1, 2, 3 ... в одной вертикальной плоскости они займут положение $1', 2', 3' ...$ на деформационной кривой. Через два года они окажутся на другой кривой — $1'', 2'', 3'' ...$, при этом на расстояниях, больших величины B , где происходят криповые смещения, точки 4, 5, 6 ... переместятся за два года на величину $2 A_0$. Так будет продолжаться до тех пор, пока максимальная ордината деформационной кривой достигнет величины $A_{\max} = B \cdot 4,7 \cdot 10^{-5}$ или относительная деформация будет равна $A_{\max} : B = 4,7 \cdot 10^{-5}$. Это значение получено японским ученым Рикитакэ (6) в результате обработки данных по многим землетрясениям. Это среднее значение, и оно может колебаться в среднем на $\pm 1,9 \cdot 10^{-5}$, а в отдельных случаях достигать 10^{-4} .

При достижении деформаций предельных значений силы трения между поверхностями зацепления блоков уже не могут противостоять упругим напряжениям, и блоки I и II скачкообразно сместятся относительно друг друга на величину $2 A_{\max}$. Точка O на блоке I сместится в направлении O' , а точка O на блоке II — в направлении O'' . Произойдет "упругая отдача" или сейсмический толчок. Все точки на каждом из блоков окажутся в одной вертикальной плоскости. Так произойдет в том случае, если точки 1, 2, 3 ... были закреплены в одном створе до начала подготовки землетрясения, когда земная кора еще не была напряжена. Этот случай показан также на рис. 1, б для моментов времени t_0 и $t_0 + \Delta t$.

Теперь представим себе, что точки 1, 2, 3 ... закреплены в земной коре в одном створе в момент времени $t_0 + \Delta t$, когда земная кора уже деформировалась и первоначально закрепленные в одной плоскости точки в момент t_0 оказались на деформационной кривой. Если в этот момент (рис. 1, в) произойдет землетрясение, то точки O , 1, 2, 3 ... окажутся на разных кривых $O', 1', 2', 3' ...$ как на блоке I, так и на блоке II (рис. 1, г). Расстояние $O'O''$ будет равно $2 A_0 \cdot \Delta t$. Кривая $O'1'2'3'$ на блоке I, на которой окажутся геодезические пункты после землетрясения, близка к экспоненциальной кривой

$$y = A \cdot e^{-\alpha x} \quad (1)$$

Этот вывод сделан на основании данных по многим землетрясениям, происшедшим в местах, где геодезические измерения выполнялись до и после землетрясения (7).

Если после землетрясения положение геодезических пунктов аппроксимировалось кривой (1), то до землетрясения уравнение правой ветви деформационной кривой имело вид (рис.1,в)

$$y = A(1 - e^{-\alpha x}) \quad (2)$$

а левой ветви

$$y = A(e^{\alpha x} - 1) \quad (3)$$

согласно принятой системе координат.

В работе (5) впервые были выполнены расчеты, в которых уравнение деформационной кривой выражалось гиперболическим тангенсом

$$y = Ath\alpha x = \frac{e^{\alpha x} - e^{-\alpha x}}{e^{\alpha x} + e^{-\alpha x}} \quad (4)$$

Эта экспоненциальная кривая, выражающая характер как правой, так и левой ветви деформационной кривой, лучше согласуется с данными, полученными из измерений, выполненных после некоторых землетрясений. В действительности характер деформационной кривой должен будет уточняться в результате измерений координат ее точек в процессе геодезического мониторинга, выполняемого до землетрясения.

В уравнении (4) величина A равна половине относительного смещения U блоков за время Δt , прошедшее между моментом t_0 закрепления точек 1, 2, 3, ... в одной вертикальной плоскости и моментом измерения координат точек деформационной кривой. К этой величине A будут стремиться ординаты точек кривой при увеличении абсцисс этих точек.

Коэффициент α в уравнении (4) характеризует скорость нарастания ординат y с увеличением x , его размерность обратна размерности x . Чем больше α , тем при меньших значениях x ординаты y будут приближаться к A (5). На рис.3 приведены деформационные кривые, построенные по данным таблицы, рассчитанным для различных значений α .

Чем меньше α , тем дальше в тело блока проникают упругие деформации, а это означает, согласно утверждению сейсмологов, что нужно ожидать землетрясения значительной магнитуды.

Величина коэффициента α , с одной стороны, будет зависеть от длины L зоны сцепления блоков, а, следовательно, от величины поверхности сцепления S . Чем больше будут эти величины, тем медленнее будут нарастать деформации и тем больше окажется величина B и меньше α .

С другой стороны коэффициент α будет в определенной степени отражать упругое напряженное состояние горных пород, т.е. будет зависеть от модуля упругости среды. Чем больше будет сопротивляемость этих пород, тем

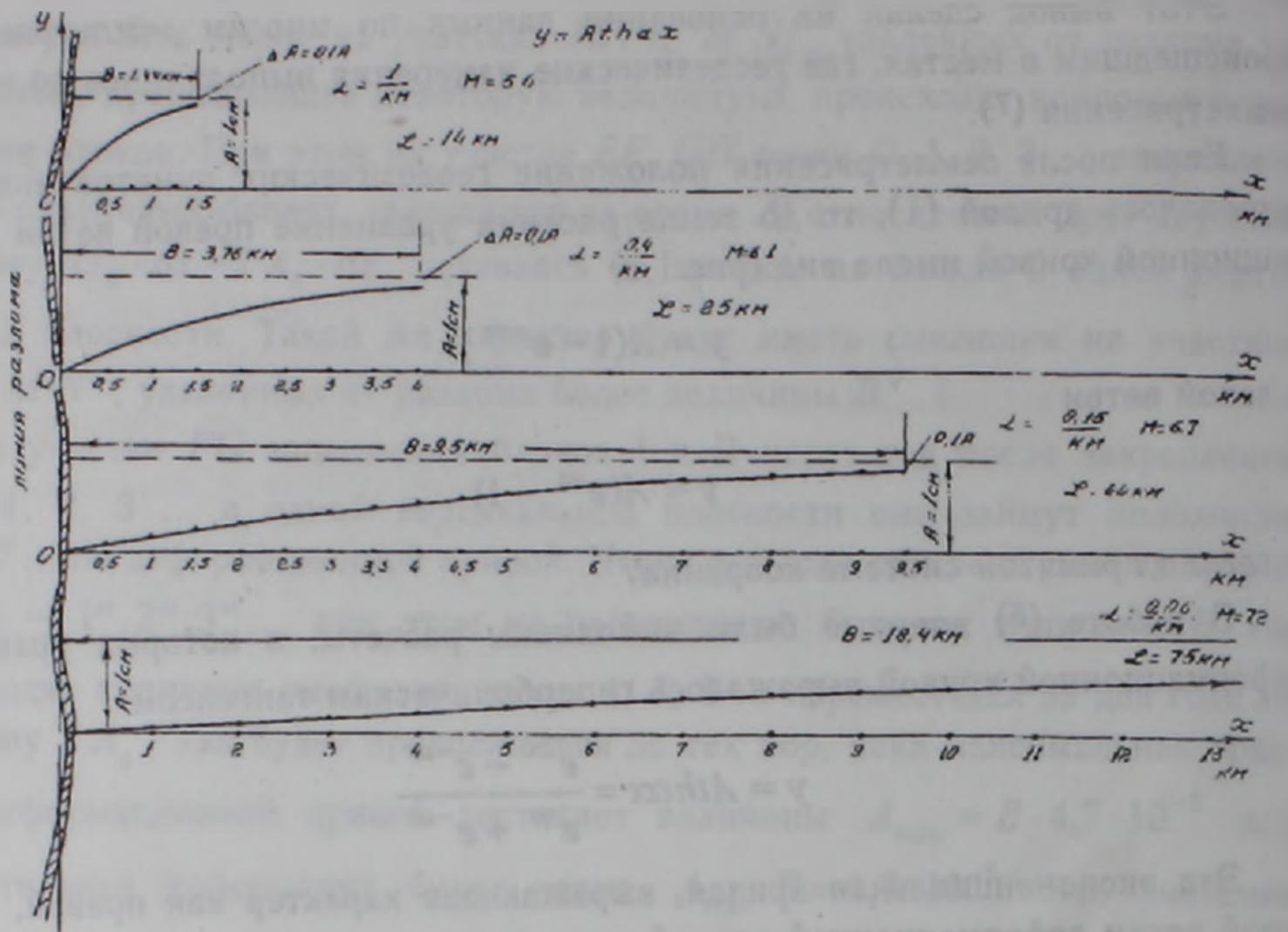


Рис. 3

меньше будет α и тем большие деформации A_{\max} накопятся за время подготовки сейсмического толчка.

Таким образом, можно утверждать, что должна существовать математическая зависимость между характеристикой геодезического предвестника — коэффициентом α в формуле деформационной кривой (4) и магнитудой M готовящегося землетрясения на участке зацепления двух сейсмогенных блоков, перемещающихся в противоположных направлениях.

Чтобы найти функцию $M=f(\alpha)$, необходимо иметь достаточное количество данных о параметрах уже происшедших землетрясений, а также иметь теоретический подход к решению задачи.

В работе замечательного русского сейсмолога Ю.В.Ризниченко (8) изложены результаты обработки данных многих землетрясений, часть из которых приведена в таблице. Для определения зависимости M от α достаточно знать магнитуду землетрясения и происшедшую подвижку крыльев очага U_{\max} или $A_{\max} = U_{\max} / 2$.

Для того чтобы найти зависимость между M и α , предварительно найдем зависимость между α и относительной деформацией ε , используя формулу (4). Дифференцируя эту формулу, получим

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \frac{A \cdot \alpha}{Ch^2 \alpha x} = \varepsilon \quad (5)$$

Максимальное значение ε_{\max} при $x=0$ будет

$$\varepsilon_{\max} = A \cdot \alpha \quad (6)$$

откуда

$$\alpha = \frac{\varepsilon_{\max}}{A} \quad (7)$$

Как уже отмечалось, из обработки данных значительного числа землетрясений получено среднее значение относительной максимальной деформации

$$\varepsilon_{\max} = 4,7 \cdot 10^{-5} \pm 1,9 \cdot 10^{-5} \quad (8)$$

Используя это значение и приведенные в таблице данные о магнитудах и соответствующих им максимальных величинах $A_{\max} = U_{\max} : 2$, вычислены коэффициенты α , записанные в третьем столбце таблицы.

Зависимость коэффициента α от магнитуды M

№	Магнитуда M	Величина подвижки крыльев очага U , см	$\alpha = 1 / \text{км}$
1	5	3,5	2,68
2	5,6	9,2	1,02
3	6,1	24	0,39
4	6,7	64	0,15
5	7,2	170	0,055
6	7,8	440	0,021
7	8,4	1200	0,008
8	8,9	3100	0,008

Анализируя эти данные, нетрудно найти ключ к четко просматриваемой эмпирической зависимости между магнитудой M и коэффициентом α . При изменении магнитуды на (0,6 – 0,5) единиц коэффициент α увеличивается в 2,6 раза. Исходя из этого можно написать

$$M = 8,9 - 0,6 \frac{\lg \frac{\alpha}{0,003}}{\lg 2,6} \quad (9)$$

После преобразования формула (9) принимает вид

$$M = 5,5 - 1,4 \lg \alpha \quad (10)$$

По полученной формуле рассчитаны магнитуды землетрясений после предварительного расчета α согласно данным, приведенным в таблице. Сходимость расчетных данных с действительными значениями магнитуд оценивается в 0,2 единицы. По магнитуде M и известной в сейсмологии зависимости можно определить величину L .

Таким образом, впервые найдена математическая зависимость между характеристикой геодезического предвестника – деформационной кривой и параметрами очага будущего землетрясения и предложена теория деформа-

ционного предвестника. Какое практическое применение могут иметь полученные результаты?

В работах (2.5) говорится о том, что геодезические построения в поперечных к разлому направлениях должны простираться на 10 и более километров для того, чтобы получить данные о характере упругих деформаций земной коры в зоне подготовки землетрясения.

На рис.1 показан поперечник длиной 3 км, на котором закреплены 6 точек, расположенных на расстоянии 0,5 км друг от друга. Такого числа точек достаточно, чтобы по значениям их координат определить коэффициент α . Из формулы (4) следует, что для определения неизвестных A и α достаточно иметь два уравнения. Измерив на местности координаты двух точек (x и y), можем вычислить значения A и α . Для контроля будут использованы координаты дополнительных точек.

Таким образом, выполнив высокоточные геодезические измерения лишь на одном створе небольшой протяженности и вычислив α , мы сможем получить данные о магнитуде M и длине очага L будущего землетрясения.

Заглядывая несколько вперед, можно сказать, что деформационная кривая несет в себе информацию и о других параметрах землетрясения: о сейсмическом моменте, ширине поверхности разрыва, величине подвижки крыльев поверхности разрыва. Для всех указанных параметров можно найти эмпирические зависимости от α .

Дальнейшее развитие теории геодезического — деформационного предвестника будет освещено в последующих публикациях. Можно надеяться, что развитие этой теории приведет к новым результатам, которые позволят приблизиться к краткосрочному прогнозу. Логика подсказывает, что в деформационной кривой, изменение ординат которой есть результат медленного, постепенного накопления упругих напряжений, должна изменяться скорость роста ординат y перед землетрясением. Следовательно, обнаружив очаг будущего землетрясения и организовав непрерывное наблюдение за деформациями, можно будет обнаружить наличие краткосрочного геодезического предвестника.

Таким образом, мы видим реальные возможности приблизиться к решению сложнейшей проблемы прогноза землетрясений, в частности, в более глубоком изучении деформационного предвестника землетрясений.

Ереванский архитектурно-строительный институт
Национальная служба сейсмической защиты РА

Հայաստանի ԳԱԱ ակադեմիկոս Ռ. Հ. ՄՈՎՍԻՍՅԱՆ

Երկրաշարժերի գեոդեզիական դեֆորմացիոն նախագուշակ

Հողվածում քննարկվում են երկրաշարժերի կանխագուշակման վերաբերող հարցերը: Կանխագուշակել երկրաշարժը նշանակում է պատասխանել 3 հարցերի. որտեղ, ինչպիսի մագնիտուդով և երբ տեղի կունենա հերթական սեյսմիկ հարվածը: Պրոբլեմը չափազանց բարդ է: Չկան մաթեմատիկական օրինաչափություններ, որոնց օգնությամբ հնա-

րավոր է որոշել, երբ երկրի խորքերի այս կամ այն ծավալի մեջ դանդաղ ընթացող պրոցեսները կընդհատվեն թուխքային փոփոխությամբ:

Հողվածում առաջարկվում է նոր մեթոդիկա ապագա երկրաշարժի օջախի տեղը կանխագուշակելու և նրա մագնիտուդը գնահատելու համար: Մեթոդիկան հիմնված է ճշգրիտ գեոդեզիական չափումների վրա, այսինքն գեոդեզիական դեֆորմացիոն նախագուշակի ուսումնասիրության վրա:

Հայտնաբերված է մաթեմատիկական օրինաչափություն գեոդեզիական նախագուշակի բնութագրերի և ապագա երկրաշարժի մագնիտուդի և ենթադրվող օջախի երկարության միջև:

Ստացած օրինաչափությունը հնարավորություն է տալիս համեմատաբար կարճ ճանապարհով և քիչ ծախսերով պատասխանել վերը նշված երեք հարցերից երկուսին. որտեղ և ինչ մագնիտուդով է սպասվում հերթական երկրաշարժը: Դա հնարավորություն կտա երկրաշարժագետներին կենտրոնացնել կոնկրետ տարածքի վրա բոլոր հնարավոր միջոցները երրորդ հարցին, երբ կարող է տեղի ունենալ սեյսմիկ հարվածը, ավելի մեծ հավանականությամբ պատասխանելու համար:

ЛИТЕРАТУРА – ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- 1 С.С.Григорян, ДАН СССР, т.306, с.1083-1087 (1989).
- 2 А.К.Певнев, Изв. АН СССР, сер. Физика Земли, №12, 1988.
- 3 Дж.А.Эйби, Землетрясения, М., Недра, 1982.
- 4 G.F.Reid, Bull.Department Geology. Univ. Calif. Publ., v.6, №19, p.413-444 (1911).
- 5 Р.А.Мовсесян, ДНАН Армении, т.96, №2-4, с.76-82 (1996).
- 6 Т.Рикитаке, Предсказание землетрясений, М., МИС, 1979.
- 7 В.Н.Магницкий, Внутреннее строение и физика Земли, 1965.
- 8 Ю.В.Ризниченко, Исследования по физике землетрясений, М., Наука, 1976.