

## Остаточные наклоны поверхности Земли при некоторых близких землетрясениях

К.З. Картвелишвили, Д.К. Картвелишвили

Исследование очагов землетрясений представляет собой одну из важнейших проблем сейсмологии. С этим вопросом связано определение величин, характеризующих остаточные поля смещений, деформаций и наклонов поверхности Земли. Известно, что по современным представлениям очаг землетрясения может быть двух типов – поверхностным (разрывным) или объемным. Поверхностный очаг – это две внутренние, касающиеся поверхности, из которых одна скользит по отношению к другой. Объемный очаг связан с внезапным расширением или сжатием некоторого трехмерного тела, называемого очаговой областью.

Применение методов упругой теории дислокации дает возможность исследовать разломы в земной коре, а также возникновение поверхностей упругих дислокаций и их воздействие на поле смещений, деформаций и наклонов на поверхности Земли. Поскольку поверхность дислокации – это поверхность, на которой нарушается непрерывность смещений, то в этом смысле любой разлом в теле Земли можно охарактеризовать, как дислокацию огромных размеров.

В настоящей работе для исследования дислокационных эффектов проанализированы остаточные наклоны поверхности Земли, зарегистрированные в Тбилиси при близких землетрясениях.

Для исследования дислокационных эффектов и определения геометрических параметров очагов землетрясений были проанализированы остаточные изменения на записях приливорегистрирующей аппаратуры, вызванные землетрясениями, происшедшими в районе, который ограничивается координатами

$\varphi = 41^{\circ}, 13 - 41^{\circ}, 43$  с.ш.

$\lambda = 43^{\circ}, 75 - 44^{\circ}, 00$  в.д.

Этот район характеризуется высокой сейсмичностью, и за 1971-1986 гг там произошло несколько сильных (Дманисское  $M=5,3$ , Параванское  $M=5,4$ ) и большое количество землетрясений с магнитудами 3,6 и выше.

В таблице I приводятся основные параметры наиболее сильных землетрясений, для которых в Тбилиси были зарегистрированы остаточные наклоны и деформации, и которые были использованы для определения смещений на дислокации и азимутов этих дислокационных поверхностей.

Таблица 1

## Основные данные о землетрясениях

N	Дата	φ с.ш.	λ в.д.	M	Δφ <sub>C-Ю</sub> мсек	Δφ <sub>В-З</sub> мсек	lΔφ <sub>l</sub> мсек
1	22 35 08. 9.71	41,26	44,0	4,5	3,16	9,0	9,0
2	0 34 30.3.74	41,4	43,98	3,9	6,0	5,2	7,9
3	19 42 14.3.77	41,4	44,0	4,2	4,44	0,84	4,6
4	14 32 18.6.77	41,83	43,88	4,0	1,6	8,0	8,16
5	19 12 17.1.78	40,85	44,4	3,8	1,0	1,1	1,49
6	9 04 15.8.78	41,13	44,0	4,6	4,4	6,0	7,44
7	12 16 14. 4 83	41,28	43,45	4,0	5,3	10,0	11,27

Данные таблицы I были использованы для вывода эмпирического соотношения, связывающего длину вектора остаточного наклона с магнитудой землетрясения M:

$$M=3,5 + 0,94 l \lg \Delta \varphi$$

На рис I приведен график зависимости между магнитудой землетрясения M и длиной вектора остаточного наклона lΔφ.

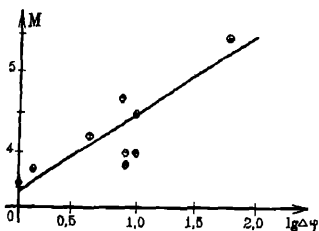


Рис. I График зависимости между магнитудой землетрясения и длиной вектора остаточного наклона

Известно, что дислокационная поверхность создает поле смещений в области, близкой к ней, хотя никаких внешних сил в момент возникновения дислокационной поверхности и после этого на среду не приложено. Оказалось, что поле смещений, вызванное сдвиговой дислокацией, эквивалентно полю смещений, вызванному системой двойных пар сил, приложенных к элементам поверхности дислокации. Используя этот принцип эквивалентности, мы получили выражения для полей смещений, вызванных возникновением поверхностей сдвиговых дислокаций.

Пусть имеется поверхность дислокации  $\Sigma$ , на которой расположена точка P. Допустим, что  $\nu_k$  нормаль к поверхности  $\Sigma$  в точке  $P(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$  и смещение в точке P равно:

$$\Delta u_k(P) = u_k^+ - u_k^-, \quad (k=1,2,3), \quad (1)$$

где  $u_k^+$  - смещение поверхности  $\Sigma^+$  дислокации по отношению к начальному положению,

а  $u_k^-$  - смещение поверхности  $\Sigma^-$ .

Если обозначить элемент поверхности  $\Sigma$  через  $d\Sigma$ , то можно получить выражение поля смещений вне дислокационной поверхности в точках  $Q(x_1, x_2, x_3)$  в том случае, когда эта дислокационная поверхность расположена в некотором полупространстве  $S$ , а точка  $Q$  – на свободной поверхности этого полупространства. Если поверхность полупространства  $S$  совпадает с плоскостью  $x_3=0$ , и положительная часть оси  $x_3$  направлена внутрь полупространства, то на поверхности  $S$  для нормальных компонент напряжения будем иметь

$$\tau_{13} = \tau_{23} = \tau_{33} = 0 \quad \text{при } x_3 = 0,$$

и, с учетом этих условий, получим выражение тензора Грина  $W_{k\ell}^m$  для полупространства

$$W_{k\ell}^m = \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} \left[ \lambda \delta_{k\ell} \frac{\partial u_m^i}{\partial \xi_i} + \mu \left( \frac{\partial u_m^k}{\partial \xi_\ell} + \frac{\partial u_\ell^m}{\partial \xi_k} \right) \right] \quad (2)$$

Если подставить выражение  $W_{k\ell}^m$  в уравнение Вольтерра

$$u_m(Q) = \iint_{\Sigma} \Delta u_k(P) W_{k\ell}^m(P, Q) v_\ell d\Sigma, \quad (3)$$

и допустить, что, рассматриваемая нами, упругая дислокация  $\Sigma$  вертикальна, размещается в плоскости  $\xi_2=0$  и имеет форму прямоугольника, то из формулы (3) можно вывести следующее выражение

$$u_k(Q) = \frac{\lambda + \mu}{\lambda + 2\mu} \frac{U_3}{8\pi} \int_{-L}^L \int_d^D \left( \frac{\partial u_3^k}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_2^k}{\partial \xi_3} \right) d\xi_1 d\xi_3, \quad (4)$$

для вертикального разлома со скольжением по падению.

В этих уравнениях принято что  $\lambda, \mu$  – параметры Ламе,  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера,

$U_3 = \Delta u_k(P) = u_3^+ - u_3^- = \text{const}$  – смещение на дислокации,  $\frac{\partial u_k^m}{\partial \xi_\ell} + \frac{\partial u_\ell^m}{\partial \xi_k}$  – смещение в точке  $Q$ ,

вызванное двумя компланарными, взаимно перпендикулярными парами сил с моментами, приложенными в точке  $P$ .

Учитывая, что наклоны равны  $\Delta \varphi_k = \frac{\partial u_3}{\partial x_k}$  ( $k=1,2$ ) и, подставляя выражения для  $u_k^m$  в

формулу (4), можно получить

$$\frac{\partial u_3}{\partial x_1} = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{x_2 \xi_3}{S} \left( \frac{1}{S^2} + \frac{1}{(x_1 - \xi_1)^2 + x_2^2} \right) \right] \parallel \quad (5)$$

$$\frac{\partial u_3}{\partial x_2} = \frac{U_3}{2\pi} \left[ \frac{\xi_3 (x_1 - \xi_1)}{x_2^2 + \xi_3^2} \left( \frac{\xi_3^2 - x_2^2}{S(x_1^2 + \xi_3^2)} + \frac{(x_1 - \xi_1)^2 + \xi_3^2}{S_1} + \frac{x_2^2 + \xi_3^2}{S((x_1 - \xi_1)^2 + x_2^2)} \right) \right] \parallel \quad (6)$$

В этих выражениях принято, что  $\lambda=\mu$ , подвижка по разлому однородна,  $P$  находится на дислокационной поверхности,  $Q$  – на свободной поверхности полупространства, и знак  $\parallel$  означает следующее

$$\parallel f(\xi_1, \xi_3) = f(L, D) - f(L, d) - f(-L, D) + f(-L, d)$$

По вышеприведенным формулам были обработаны скачкообразные изменения наклонов поверхности Земли для следующих сильных землетрясений

1. 22° 35' 8.9.1971 M=4.5  $\varphi=41.26$   $\lambda=44.0$  (Дманисское)  
Наклоны: 3.16 мсек к северу,  
9.00 мсек к востоку.
2. 0° 34' 30.3.1974 M=3.9  $\varphi=41.4$   $\lambda=43.98$   
Наклоны: 6.00 мсек к югу,  
5.20 мсек к западу.
3. 19° 42' 14.3.1977 M=4.2  $\varphi=41.4$   $\lambda=44.0$  (Дманисское)  
Наклоны: 4.44 мсек к северу,  
0.86 мсек к востоку.
4. 14° 32' 18.6.1977 M=4.0  $\varphi=41.83$   $\lambda=43.88$   
Наклоны: 1.6 мсек к северу,  
8.0 мсек к востоку.
5. 19° 12' 17.1.1978 M=3.8  $\varphi=40.85$   $\lambda=44.4$   
Наклоны: 1.0 мсек к югу,  
1.1 мсек к западу.
6. 9° 04' 15.8.1978 M=4.6  $\varphi=41.13$   $\lambda=44.4$   
Наклоны: 1.0 мсек к югу,  
6.0 мсек к западу.
7. 12° 16' 14.4.1983 M=4.0  $\varphi=41.28$   $\lambda=43.45$   
Наклоны: 5.2 мсек к северу,  
10.0 мсек к востоку.

На рис. 2 приводится копия записи скачкообразных наклонов для землетрясения от 8.9.71 г.

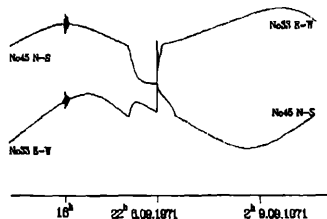


Рис. 2 Копия записи скачкообразных наклонов, вызванных Параванским землетрясением от 8.9. 1971 г.

С использованием вышеприведенных данных для каждого из семи землетрясений была составлена система из двух уравнений с двумя неизвестными  $U_3$  - смещение на дислокационной поверхности и  $\alpha$  - азимут разлома (поверхности дислокации), на котором произошло землетрясение. Согласно Ф. Прессу (Press F., 1965) здесь было принято, что  $D \approx L \sqrt[3]{E}$ , где  $E$  - энергия землетрясения. По сейсмическим данным были известны значения  $d$  и эпицентральных расстояния до Тбилиси. Предполагалось, что азимут направления на эпицентр из Тбилиси  $\alpha = -110^\circ$ . Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты определения смещения на дислокации и азимута разлома по наблюдениям над остаточными наклонами

N	Дата	$\alpha$	M	L=D (км)	$U_3$ (м)
1	8.9.1971	120°	4.5	23.5	1.5
2	30.3.1974	60°	3.9	20.0	0.29
3	14.3.1977	60°	4.2	23.0	0.38
4	18.6.1977	40°	4.0	23.0	0.30
5	17.1.1978	60°	3.8	20.0	0.22
6	15.8.1978	60°	4.6	25.0	0.10
7	14.4.1983	70°	4.0	23.0	0.32

Литература

1. Press F., Displacements, strains and tilts at teleseismic distances, journal of Geophysical research, vol. 70, N 10. May 15, 1965.

**ახლო ძლიერი მიწისძვრებით გამოწვეული  
დეღამიწის ზედაპირის ნარჩენი დახრები**

კ. ქართველიშვილი, დ. ქართველიშვილი

რეზიუმე

მნიშვნელოვანი დახრებში ჩანაწერები იქნა მიღებული თბილისის მიწისქვეშა მიმოქცევით ლაბორატორიაში რამდენიმე ახალი ძლიერი მიწისძვრისათვის. შეფასებულ იქნა ნარჩენი დახრები, რომელთა შედარებით, რღვევის გარკვეულ თეორიულ მოდელთან საშუალება მოგვეცა გამოგვეთვალა რღვევის სიგრძე კერაში.

**Residual Tilts of the Earth surface at near  
distances from major earthquakes**

K.Z. Kartvelishvili, D.K. Kartvelishvili

**Abstract**

The remarkable tilt seismograms was written for some near earthquakes at the Tbilisi underground tidal laboratory. The observations residual tilts are examined. The procedure of comparing the observed values of tilts with values expected from the fault model is used to estimate fault length