

УДК 550.348

О. А. КУЧАЙ

## ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ АФТЕРШОКОВОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ОЧАГОВОЙ ОБЛАСТИ СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

По данным механизмов очагов 95 афтершоков ( $K=12-15$ ) Маркансуйского землетрясения, происшедшего 11.VIII 1974 г. на севере Памира, рассчитаны величины шести компонент тензора деформаций в географической системе координат. Проведено сопоставление компонент тензора деформаций афтершокового процесса и компонент тензора деформаций главного толчка. По распределению величин компонент тензора деформаций афтершокового процесса выделена очаговая область основного события и определены размеры разрыва Маркансуйского землетрясения.

В настоящее время во многих сейсмических регионах Советского Союза рассчитана скорость деформаций при сейсмическом течении горных масс [1—3] и проведено сопоставление с особенностями тектонической жизни тех или иных тектонических структур. Деформационные же процессы непосредственно в очаговых областях землетрясений до сих пор освещены недостаточно полно.

Полученные в последние годы данные позволили поставить задачу исследования деформаций очаговой области сильного землетрясения по мере развития афтершокового процесса. В предложенной работе закономерности афтершокового деформирования очаговой области сильного землетрясения рассмотрены на примере повторных толчков Маркансуйского землетрясения 11.VIII 1974 г., происшедшего на севере Памира.

Компоненты тензора деформаций за счет остаточных явлений в очагах землетрясений будем рассчитывать простым суммированием вклада деформаций каждого афтершока с учетом его сейсмического момента в общую деформацию выделенного элементарного объема:

$$\varepsilon_{ii} = \sum_{l=1}^N \varepsilon_{ii}^{(l)}, \quad \gamma_{ij} = \sum_{l=1}^N \gamma_{ij}^{(l)}, \quad i, j = x, y, z, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{ii}^{(l)}$ ,  $\gamma_{ij}^{(l)}$  — компоненты тензора деформаций в  $l$ -м очаге, определенные по известным формулам Ю. В. Ризниченко [1]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx}^{(l)} &= \varepsilon (\sin^2 \varphi_T \sin^2 \alpha_T - \sin^2 \varphi_c \sin^2 \alpha_c), \\ \varepsilon_{yy}^{(l)} &= \varepsilon (\sin^2 \varphi_T \cos^2 \alpha_T - \sin^2 \varphi_c \cos^2 \alpha_c), \\ \varepsilon_{zz}^{(l)} &= \varepsilon (\cos^2 \varphi_T - \cos^2 \varphi_c), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{xy}^{(l)} = \varepsilon (\sin^2 \varphi_T \sin \alpha_T \cos \alpha_T - \sin^2 \varphi_c \sin \alpha_c \cos \alpha_c),$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{yz}^{(l)} = \varepsilon (\sin \varphi_T \cos \alpha_T \cos \varphi_T - \sin \varphi_c \cos \alpha_c \cos \varphi_c),$$

$$\frac{1}{2} \gamma_{zx}^{(i)} = \varepsilon (\sin \varphi_r \sin \alpha_r \cos \varphi_c - \sin \varphi_c \sin \alpha_c \cos \varphi_r),$$

где  $\alpha_c$  — угол между горизонтальной проекцией оси сжатия механизма очага землетрясения и меридианом,  $\alpha_r$  — угол между горизонтальной проекцией оси растяжения и меридианом,  $\varphi_c$  — угол между направлением оси сжатия и вертикалью,  $\varphi_r$  — угол между направлением оси растяжения и вертикалью

$$\varepsilon = \frac{M_0}{2\mu\Omega}, \quad (3)$$

где  $\Omega$  — элементарная объемная область,  $\mu$  — модуль упругости на сдвиг, принимаемый равным  $3 \cdot 10^{11}$  дин/см<sup>2</sup>,  $M_0$  — сейсмический момент, определяемый в настоящей работе по известной корреляционной зависимости [4]:

$$M_0 \pm 0,6 = 11,842 + 0,889 K = 15,4 + 1,6 M. \quad (4)$$

Маркансуйское землетрясение ( $\varphi = 39,3^\circ$ ;  $\lambda = 73,7^\circ$ ;  $M = 7,3$ ) произошло в северных дугах Памира в зоне Дарваз-Каракульского разлома 11.VIII 1974 г. Оно породило мощную серию афтершоков, зона наибольшей плотности<sup>1</sup> которых и изосейсты, оконтуривающие области 6- и 7-балльных сотрясений [5], вытянуты в северо-восточном направлении.

При определении механизма очага Маркансуйского землетрясения использовались годографы Кулагиной [6] и Розовой [7] для близких сейсмостанций ( $\Delta < 10^\circ$ ) и годограф Джеффриса — Буллена для удаленных. Полученное решение — сдвиг (рис. 1) согласуется с результатами многих исследований [8–10].

Определение компонент тензора деформации за счет афтершокового процесса велось в диапазоне энергетических классов  $K$  с 12 по 15. Всего в очаговой области с 11 августа 1974 г. до конца декабря 1975 г. произошло 95 таких афтершоков. Для 78 из них удалось определить механизм очага, при этом механизмы очагов 14-го и 15-го классов определены полностью. Для 17 повторных толчков 12-го и 13-го классов механизм очага определить не удается.

Для тех ячеек осреднения, в которые попали афтершоки 12-го или 13-го класса с неопределенными механизмами, расчет проводился по формулам, позволяющим учесть вклад этих афтершоков в процесс сейсмического течения горных масс:

$$\varepsilon_{ii}(K) = \frac{N_n(K)}{N_0(K)} \sum_{l=1}^N \varepsilon_{ii}^{(l)}(K), \quad (5)$$

$$\gamma_{ij}(K) = \frac{N_n(K)}{N_0(K)} \sum_{l=1}^N \gamma_{ij}^{(l)}(K),$$

где  $N_n(K)$  — количество происшедших афтершоков класса  $K$  в ячейке осреднения,  $N_0(K)$  — число определенных механизмов этого класса в этой же ячейке.

Элементарные объемы, для которых определялись средние значения тензора деформаций, имели размеры по широте и долготе, равные  $0,2^\circ$ , и глубине 30 км (глубже 30 км афтершоки не зафиксированы). Для землетрясений 15-го класса размеры ячеек по широте и долготе брались равными  $0,3^\circ$ . Расчеты значений компонент деформаций для ячейки осреднения проводились методом скользящего окна с перекрытием  $0,1^\circ$ .

<sup>1</sup> Координаты Маркансуйского землетрясения и его афтершоков даны по определениям ТИССС (отчет А. П. Катов «Сейсмичность и каталог землетрясений Таджикистана за 1974 г.»).

Поле вертикальной компоненты тензора деформаций горных масс афтершокового процесса имеет достаточно сложный вид с преобладающими деформациями укорочения, причем наибольшие их значения ( $\epsilon_{zz} = -38 \cdot 10^{-7}$ ) совпадают с эпицентральной зоной основного толчка (рис. 2, а). Для краевых частей афтершоковой области характерны деформации удлинения с меньшими ( $\epsilon_{zz} = 1 \cdot 10^{-7}$ ) значениями деформаций.

В поле меридиональной компоненты  $\epsilon_{yy}$  площади, занятые деформациями укорочения, примерно в 2 раза превосходят площади, на которых

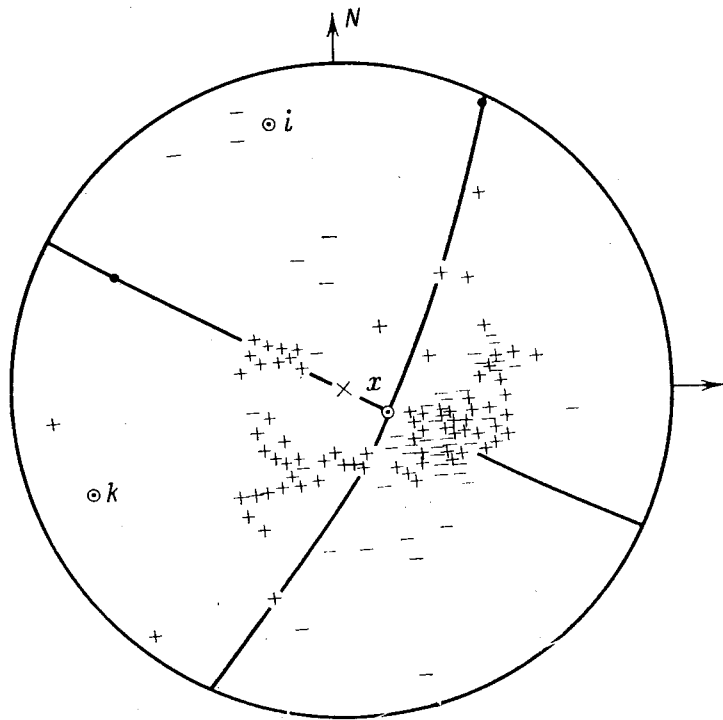


Рис. 1. Диаграмма механизма очага Маркансуйского землетрясения

имеют место деформации удлинения. Наибольшие значения деформации укорочения ( $\epsilon_{yy} = -14 \cdot 10^{-7}$ ) приурочены к северной части афтершоковой зоны, а не к очаговой области главного толчка, где их значения в 4–5 раз меньше. Положительные значения деформаций окружают эпицентр с запада, востока и юга (рис. 2, б).

В поле широтной компоненты  $\epsilon_{xx}$  отмечены только деформации удлинения и наибольшие их значения связаны с местом возникновения очага основного события (рис. 2, в).

Карты компонент сдвиговых деформаций имеют достаточно сложный характер (рис. 2, г, д, е). На всех трех картах ( $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{xz}$ ,  $\gamma_{yz}$ ) наблюдается чередование зон с положительными и отрицательными деформациями. Тем не менее на карте деформаций  $\gamma_{xy}$  положительные значения преобладают и их максимальные значения фиксируются только в очаговой области Маркансуйского землетрясения. На карте  $\gamma_{yz}$  в этой же части афтершоковой зоны проявляются максимальные отрицательные деформации. В поле компонент деформации  $\gamma_{zx}$  наибольшие значения отмечены на северо-востоке от эпицентра главного толчка.

Таким образом, конфигурация изолиний максимальных (по модулю) значений, полученных на картах компонент деформаций, позволила разделить их на два вида. В первом случае в поле компонент  $\epsilon_{zz}$ ,  $\epsilon_{xx}$ ,  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$  выделяются области наибольших деформаций, непосредственно приуроченные к эпицентральной области основного очага. Размеры этой области 40–60 км. Особенности деформаций непосредственно в очаговой области

Маркансуйского землетрясения демонстрируют эпиоры (рис. 2). Во втором случае ( $\epsilon_{yy}$ ,  $\gamma_{xz}$ ) максимум деформаций располагается северо-восточнее эпицентральной зоны на небольшой площади, имеющей поперечник 15–25 км.

Сопоставим компоненты тензора деформаций в очаге самого Маркансуйского землетрясения со средними значениями компонент деформаций, полученными по афтершоковой последовательности в очаговой области.

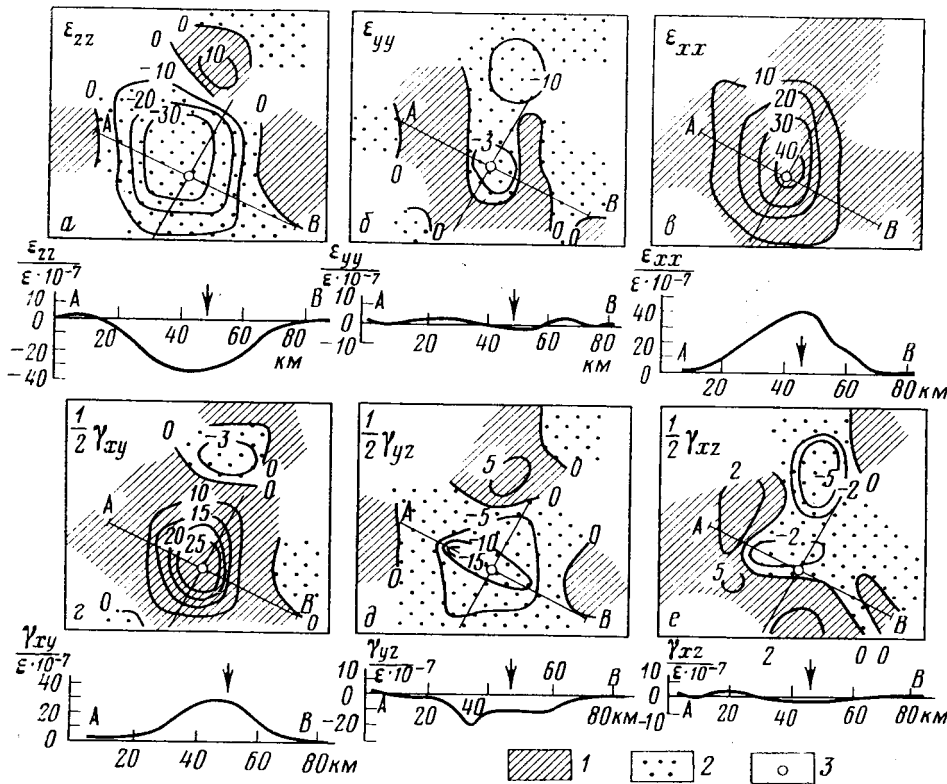


Рис. 2. Карты компонент тензора деформаций очаговой области Маркансуйского землетрясения при афтершоковом процессе (с точностью до множителя  $10^{-7}$ ) 1 — области положительных деформаций, 2 — области отрицательных деформаций (изолинии ограничивают площадки с одинаковым значением деформаций), 3 — место-положение эпицентра главного землетрясения. Прямые линии, пересекающиеся в эпицентре, — простираение плоскостей разрыва Маркансуйского землетрясения. Под каждой из карт построены эпиоры деформаций в плоскости AB. Эпиоры показывают величину деформаций ( $\epsilon_{ij} = \bar{\epsilon}_{ij} \cdot 10^7$ ), стрелкой указано положение главного землетрясения

Из таблицы следует, что по пяти компонентам:  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$ ,  $\gamma_{zx}$  деформация продолжается в том же направлении, что и в очаге главного события. Что касается компоненты  $\epsilon_{zz}$ , то здесь вопрос о наследовании остается открытым.

Сопоставим соотношения компонентов деформаций механизма очага Маркансуйского землетрясения с компонентами деформаций афтершоковой серии (таблица)

$$\begin{aligned} \epsilon_{xx}^{af} > \epsilon_{yy}^{af} > \epsilon_{zz}^{af}, & \quad \gamma_{xy}^{af} > \gamma_{zx}^{af} > \gamma_{yz}^{af}, \\ \epsilon_{xx} > \epsilon_{zz} > \epsilon_{yy}, & \quad \gamma_{xy} > \gamma_{zx} > \gamma_{yz}. \end{aligned}$$

Из приведенных неравенств следует, что говорить о полном наследовании компонентами тензоров деформаций афтершокового процесса компонент тензора деформаций главного события нельзя.

Костров и Шебалин [11] предполагают существование двух типов афтершоков, связанных с перераспределением напряжения в окрестности главного толчка. К первому типу относятся «толчки, возникающие из-за

повышения или понижения прочности среды на разрывах, которые не испытывали подвижки в период подготовки. Механизм этих толчков... в общем должен быть близок к механизму главного толчка» [11]. Ко второму типу относятся афтершоки разгрузки, для которых характерны обратные смещения по конкретным плоскостям разрыва в афтершоках относительно смещений в главном очаге. Для возникновения этих афтершоков сброшенное напряжение должно составлять более 50% от первоначального уровня напряжения. Как показывают вышеизложенные материалы наблюдений, афтершоковый процесс Маркансуйского землетрясения имеет значительно более сложный характер, нежели это предполагается теоретически. По существу афтершоковые деформации не совпадают пол-

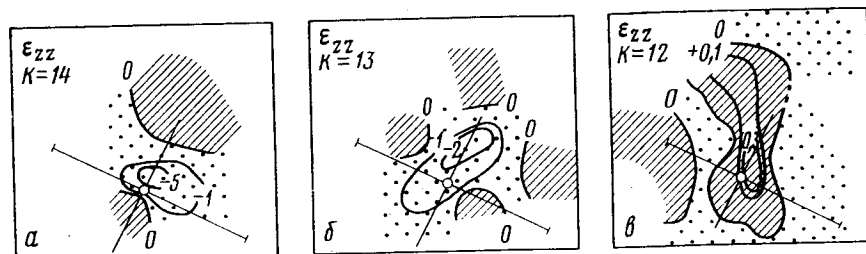


Рис. 3. Карты вертикальной компоненты  $\epsilon_{zz}$  тензора деформаций очаговой области Маркансуйского землетрясения при афтершоковом процессе:  
а —  $K=14$ ; б —  $K=13$ ; в —  $K=12$

ностью ни с механизмом наследования, ни с механизмом разгрузки.

Так как очаговая область испытывает наибольшие смещения и деформации в момент основного толчка, можно ожидать, что наибольшие величины афтершокового деформирования также проявятся именно в очаговой области. Поэтому можно полагать, что пространственно области наибольших однородных деформаций при афтершоковом процессе будут совпадать с очаговой областью основного землетрясения. По компонентам  $\epsilon_{zz}$ ,  $\epsilon_{xx}$ ,  $\gamma_{xy}$ ,  $\gamma_{yz}$  четко прослеживаются зоны наибольших однородных де-

**Сопоставление компонент среднего тензора деформаций афтершокового процесса с компонентами деформаций главного землетрясения \***

Компоненты деформаций	$\epsilon_{zz}$	$\epsilon_{xx}$	$\epsilon_{yy}$	$\frac{1}{2}\gamma_{xy}$	$\frac{1}{2}\gamma_{yz}$	$\frac{1}{2}\gamma_{zx}$
Афтершоки	-18,0	18,5	-0,5	10,1	-3,9	-0,2
Землетрясение	0	39,1	-39,1	24,4	-10,2	-5,7

\* В таблице даны значения компонент тензора деформаций с точностью до множителя  $10^{-7}$ , т. е. 39,1 в таблице в действительности означает  $39,1 \cdot 10^{-7}$ .

формаций в области очага главного землетрясения (рис. 2, а, в, г, д), имеющие в поперечнике 40–60 км. В рамках сделанных предположений можно считать, что в очаге Маркансуйского землетрясения произошло вспарывание разрыва протяженностью 40–60 км (рис. 2). Эти оценки хорошо согласуются с результатами определений длин разрывов в очагах землетрясений соответствующих энергетических классов [4].

Имеющиеся материалы позволили рассчитать величины смещений свободной поверхности, вызванные афтершоковым процессом. Наибольшие значения вертикальной компоненты афтершокового деформирования в очаговой зоне составляют  $-(36,1-37,9) \cdot 10^{-7}$ . Принимая мощность сейсмически активного слоя равной  $30 \text{ км} = 3 \cdot 10^7 \text{ мм}$ , получаем, что вертикальное опускание в эпицентральной зоне Маркансуйского землетрясения за счет афтершокового процесса составило 10 см. Такие большие смещения, безусловно, должны фиксироваться геодезическими измерениями, что на-

ходит подтверждение в очаговых областях Газлийских землетрясений, где наблюдалось поднятие земной поверхности до 70 см [12]; при Ташкентском землетрясении произошло поднятие на 3,5 см [13].

После Маркансуйского землетрясения появилась также возможность рассмотреть проблему подобия и непоподобия деформационных полей, полученных за счет афтершоков разных классов.

В нашем случае статистически представительный материал для сопоставления имеется только по землетрясениям 12, 13 и 14-го классов, на основании которых и построены три карты вертикальных деформаций. Как видно из рис. 3, деформирование афтершоковой области за счет землетрясений этих классов отличается не только величинами деформаций, зависящими от сейсмического момента, но и разным распределением типов деформаций (укорочение, удлинение) по площади. Следовательно, делаемое нередко предположение о подобии сеймотектонических деформаций землетрясений различных энергетических классов требует достаточно осторожного отношения.

Таким образом, в результате совместного анализа компонент тензора деформаций афтершокового процесса и компонент тензора деформаций основного толчка удалось установить, что афтершоковые деформации очаговой области Маркансуйского землетрясения носят достаточно сложный характер, полностью не укладывающийся ни в рамки механизма афтершокового наследования, ни в рамки механизма афтершоковой разгрузки. Область наибольших однородных деформаций афтершокового процесса очерчивает очаговую область главного события, что позволяет определить длину разрыва в очаге основного землетрясения. В очаговой зоне Маркансуйского землетрясения в результате афтершоковой деятельности произошли (судя по нашим расчетам) значительные опускания поверхности земной коры, достигающие 10 см.

#### Литература

1. Ризниченко Ю. В. Расчет скоростей деформаций при сейсмическом течении горных масс.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1977, № 10, с. 34–47.
2. Ризниченко Ю. В., Джибладзе З. А. Скорости вертикальных движений при сейсмическом течении горных масс.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1976, № 1, с. 23–31.
3. Ризниченко Ю. В., Кочетков В. М., Мишарина Л. А., Гилева Н. А. Вертикальные сеймотектонические движения в Байкальской рифтовой зоне.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1977, № 11, с. 41–53.
4. Ризниченко Ю. В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент.— В кн.: Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976, с. 9–27.
5. Уломов В. И. и др. Землетрясения Средней Азии.— В кн.: Землетрясения в СССР в 1974 г. М.: Наука, с. 49–99.
6. Кулагина М. В., Лукк А. А., Кулагин В. К. Блоковое строение земной коры Таджикистана.— В кн.: Поиски предвестников землетрясений на прогностических полигонах. М.: Наука, 1974, с. 70–84.
7. Розова Е. А. Расположение эпицентров и гипоцентров землетрясений Средней Азии.— Тр. Геофиз. ин-та АН СССР. М.—Л.: Изд-во АН СССР, 1950, № 10 (137), с. 132.
8. Широкова Е. И. Механизм Маркансуйского землетрясения 1974 г. и его афтершоков.— Изв. АН СССР. Физика Земли, 1981, № 1, с. 72–80.
9. Кучай О. А., Соболева О. В. Особенности механизмов афтершоков Маркансуйского землетрясения. Деп. 4190–79. М. ВИНТИ, 1979. 9 с.
10. Jackson J., Molnar P., Patton H., Fitch T. Seismotectonic Aspects of the Markansuy valley, Tadjikistan, Earthquake of August 11, 1974.— J. Geophys. Res., 1979, v. 84, № B11, p. 6157–6167.
11. Костров Б. В., Шебалин Н. В. Движение в очагах афтершоков Дагестанского землетрясения и теория разрушения.— В кн.: Исследование по физике землетрясений. М.: Наука, 1976, с. 87–94.
12. Уломов В. И. Физическая модель очаговой области Газлийских землетрясений 8 апреля и 17 мая 1976 г.— В кн.: Сейсмические исследования в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1979, с. 53–63.
13. Уломов В. И. Деформация горных масс в области очага.— В кн.: Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 г. Ташкент: Фан, 1971, с. 58–68.

Поступила в редакцию  
5.II.1982