

Б.Г.Букчин, А.Л.Левшин, Л.И.Ратникова, Б.Дост, Г.Нолет

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ОЧАГА СПИТАКСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО ШИРОКОПОЛОСНЫМ
ЗАПИСЯМ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

B.G.Bukchin, A.L.Levshin, L.I.Ratnikova, B.Dost, G.Nolet

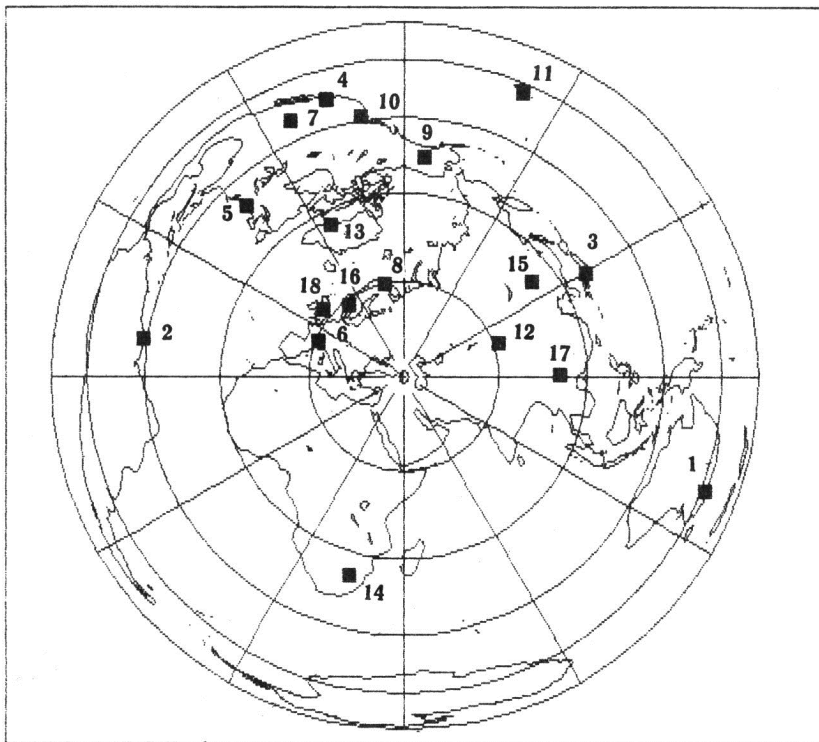
AN ESTIMATE OF SPATIAL-TEMPORAL CHARACTERISTICS
OF THE SOURCE FOR SPITAK EARTHQUAKE USING WIDE-RANGE
DIGITAL RECORDS OF SURFACE WAVES

Seismic moment and focal mechanism of Spitak earthquake are determined by the analysis of long-period spectrum of surface waves. Graphic presentation of the results illustrates the discrimination quality of vector orientation for compression and dilatation. Analysis of surface waves in shorter period ranges yields integral estimates for source duration, source geometry and the rupture spreading process along the fault. The quality of those estimates is also discussed.

В работе описана методика определения пространственно-временных характеристик сейсмического источника из совместного анализа спектров различных поверхностных волн и приведены результаты ее применения для изучения очага Спитакского землетрясения (7.12.1988 г.). Были использованы спектры фундаментальных мод Лява и Рэлея, зарегистрированных широкополосными станциями мировой сейсмической сети и сверхдлиннопериодными станциями сети GEOSCOR, расположение которых относительно эпицентра землетрясения показано на рис.1. Эти волны выделялись из записей с помощью программ спектрально-временного анализа и плавающей фильтрации.

Определение характеристик очага землетрясения проводилось в два этапа.

На первом этапе из анализа длиннопериодной части спектра смещений был определен тензор сейсмического момента. Для этого использовались спектры поверхностных волн, зарегистрированных станциями сети GEOSCOR в диапазоне периодов от 100 до 200 с. На этой стадии источник рассматривался как мгновенный и точечный. В этом приближении спектр k -й компоненты смещений в некоторой моде Лява или Рэлея $u_k(x, \omega)$ может быть описан следующей формулой



Р и с. 1. Расположение регистрирующих станций относительно эпицентра землетрясения

1 - 6 - станции сети GEOSCOPE: 1 - CAN, 2 - CAY, 3 - INU, 4 - SCZ, 5 - WFM, 6 - SBB; 7 - 18 - широкополосные станции: 7 - ANMO, 8 - KEV, 9 - COL, 10 - LON, 11 - NON, 12 - WMQ, 13 - GDH, 14 - SLR, 15 - HIA, 16 - KON, 17 - KMI, 18 - MMY

$$u_k(\mathbf{x}, \omega) = - (i/\omega) M_{mn} \frac{\partial}{\partial y_n} G_{km}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega). \quad (1)$$

Здесь ω - угловая частота; M_{mn} - элементы тензора сейсмического момента; G_{km} - часть спектра функции Грина, соответствующая выбранной поверхностной волне; \mathbf{x} - радиус-вектор точки регистрации; \mathbf{y} - радиус-вектор источника; $k, m, n = 1, 2, 3$. По повторяющимся индексам здесь и далее производится суммирование.

Будем считать, что упругие свойства среды в горизонтальных направлениях изменяются мало на длине волны. В этом предположении функция Грина зависит от строения среды в окрестности источника и в окрестности точки регистрации, от средней фазовой медленности волны вдоль пути распространения и от геометрического расхождения (соответствующие формулы приведены в [1]). Заметим, что от фазовой медленности зависит лишь фазовый спектр функции Грина. При расчете

геометрического расхождения предполагалось, что волны распространяются вдоль дуг больших кругов.

При заданных моделях среды, координатах и времени действия источника формула (1) определяет систему линейных уравнений для элементов тензора сейсмического момента M_{mn} (по одному комплексному уравнению на каждый тип волны для каждой точки регистрации x и частоты ω). Но обычно средние фазовые медленности поверхностных волн известны с недостаточной степенью точности, которая возрастает с уменьшением частоты ω , так как при этом спектральные характеристики волн определяются более однородными в горизонтальных направлениях глубокими слоями. Как было отмечено выше, эти погрешности влияют лишь на фазовый спектр смещений. То же самое справедливо и для ошибок в координатах эпицентра и во времени действия источника. Их влияние на фазовый спектр также уменьшается с уменьшением частоты ω . Поэтому, как правило, для определения тензора сейсмического момента мы использовали лишь амплитудные спектры регистрируемых смещений (соответствующие уравнения при этом уже не линейны по M_{mn}). Фазовые же спектры использовались только для самых низких частот из анализировавшегося спектрального диапазона.

Была реализована процедура прямого перебора возможных значений искомым параметров в предположении, что источник является идеальной плоской подвижкой (двойным диполем). В этом случае тензор сейсмического момента определяется фокальным механизмом (направлениями главных осей сжатия и растяжения) и сейсмическим моментом. Для каждого пробного фокального механизма система уравнений (1) содержит лишь одну неизвестную величину – скалярный сейсмический момент и может быть решена в смысле наименьших квадратов. Из сравнения вычисленных и наблюдаемых спектров (исправленных за частотную характеристику аппаратуры и затухание) определим невязку ε , характеризующую их различие.

Пусть $u^{(i)}$ – i -е наблюдаемое значение комплексного спектра ($i=1, \dots, N$), $\varepsilon_{amp}^{(i)}$ – невязка амплитудного спектра $|u^{(i)}|$, а $\varepsilon_{ph}^{(j)}$ – невязка фазового спектра $\arg(u^{(j)})$, $j=1, \dots, n$ (как было отмечено выше, фазовые спектры использовались лишь для самых низких частот, поэтому справедливо неравенство $n < N$). Определим нормированную амплитудную невязку:

$$\varepsilon_{amp} = \left[\left(\sum_{i=1}^N \varepsilon_{amp}^{(i)2} \right) / \left(\sum_{i=1}^N |u^{(i)}|^2 \right) \right]^{1/2}; \quad (2)$$

Аналогично определим нормированную фазовую невязку:

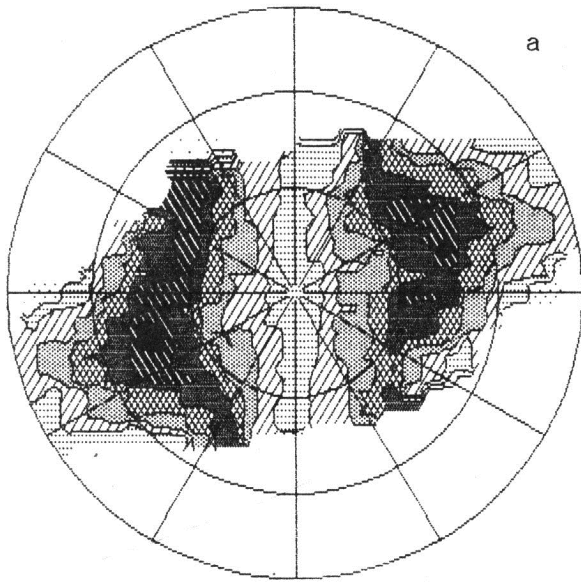
$$\varepsilon_{ph} = \frac{1}{\pi} \left[\left(\sum_{i=1}^n \varepsilon_{ph}^{(i)} \right)^2 / n \right]^{1/2}. \quad (3)$$

И, наконец, суммарная нормированная невязка, определяющая качество совпадения наблюдаемых величин с вычисленными при некотором текущем фокальном механизме, задается выражением

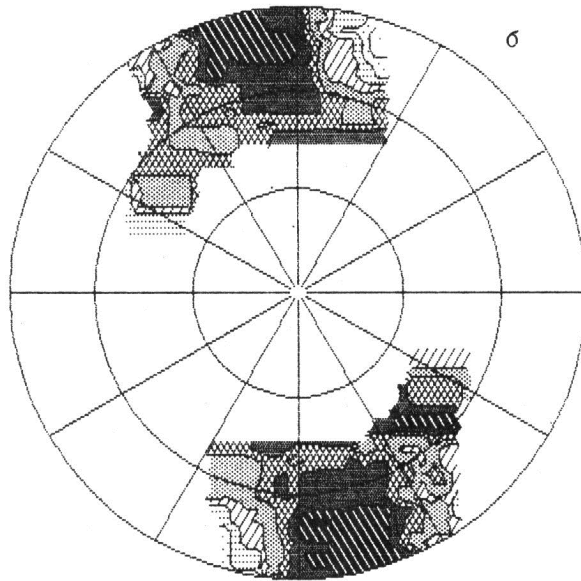
$$\varepsilon = 1 - (1 - \varepsilon_{amp})(1 - \varepsilon_{ph}). \quad (4)$$

Зафиксировав ориентацию главной оси растяжения, поставим ей в соответствие минимальную невязку ε при всех возможных ориентациях главной оси сжатия. Таким образом мы определим функцию качества всех возможных направлений главной оси растяжения, аналогичная функция качества может быть определена и для главной оси сжатия. Эти функции могут быть представлены в виде карт, на которых каждое направление соответствующей оси (точка на стереографической проекции на нижнюю полусферу) характеризуется качеством, а именно – величиной нормированной невязки. Направление, в котором невязка достигает минимума, определим как оценку ориентации данной оси. В то же время эти карты характеризуют качество разрешения определяемого фокального механизма. На рис.2 изображены такие карты для главных осей сжатия и растяжения очага Спитакского землетрясения, полученные по записям станций сети GEOSCOPE; более темные участки соответствуют меньшей невязке ε . Минимальная невязка равна 0,49 (при этом $\varepsilon_{amp} = 0,22$; $\varepsilon_{ph} = 0,35$), интервал между уровнями невязки равен 0,03. Минимальная невязка соответствует следующему фокальному механизму: угол простирания – 293° , угол падения – 69° и уклон – 131° . На рис.3 приведена стереографическая проекция нодальных плоскостей на нижнюю полусферу. Эти результаты соответствуют глубине наилучшего точечного источника 5 км. Для сейсмического момента была получена оценка $1,6 \cdot 10^{19}$ н·м. При проведении расчетов для описания верхних 175 км среды в окрестности очага была использована модель 1 из таблицы, для больших глубин использовалась континентальная модель Гутенберга, в точках регистрации была принята модель PREM.

Заметим, что источники с симметричными относительно вертикальной оси фокальными механизмами в случае, когда они расположены на свободной поверхности, излучают одно и то же поле поверхностных волн. В рассматриваемом случае малая глубина источника приводит к тому, что симметричные относительно вертикальной оси фокальные механизмы оказываются близкими по качеству.



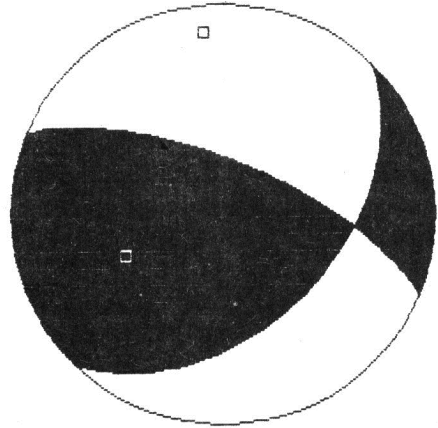
а



б

Р и с. 2. Карты качества для ориентации главной оси растяжения (а) и главной оси сжатия (б)

Р и с. 3. Фокальный механизм землетрясения



На втором этапе из анализа менее длиннопериодных амплитудных спектров фундаментальных мод Лява и Рэлея, зарегистрированных широкополосными станциями, были получены оценки параметров, характеризующих геометрию очаговой области, продолжительность действия источника и распространение разрыва на разломе.

Для описания очага землетрясения мы использовали формализм, предложенный в работе [2]. При этом были сделаны следующие предположения. Очаг представляет собой идеальную плоскую подвижку фиксированного направления, распределение интенсивности которой на разломе описывается некоторой скалярной функцией $f(x, t)$, такой, что ее частная производная по времени $\dot{f}(x, t)$ неотрицательна, т.е. отсутствует обратное движение. Тензор избыточных напряжений такого источника может быть представлен в виде

$$\Gamma(x, t) = f(x, t)M, \quad (5)$$

где M - постоянный нормированный тензор сейсмического момента, так что $\sum_{i,j} M_{ij}^2 = 2$. Следуя [2], мы определяем область очага землетрясения как пространственную область, в каждой точке которой $\dot{f}(x, t)$ не равна тождественно нулю. Время действия источника определяется как промежуток времени, в течение которого в различных точках очаговой области происходят неупругие движения, т.е. $\dot{f}(x, t)$ отлична от нуля.

Пространственно-временные характеристики очага землетрясения могут быть выражены через пространственно-временные моменты функции $\dot{f}(x, t)$ суммарной степени (по пространственным координатам и по времени) 0, 1, и 2 (см. [3,4]). В свою очередь эти моменты могут быть оценены по записям смещений среды на свободной поверхности. Приведем формулы, определяющие оценки временных и геометрических характеристик очага землетрясения. Расположение центра масс поля

неупругих движений $\dot{f}(\mathbf{x}, t)$ оценивается пространственным центроидом \mathbf{q}_c , который определяется следующей формулой

$$\dot{f}^{(0,0)} \mathbf{q}_c = \dot{f}^{(1,0)}(0), \quad (6)$$

где

$$\dot{f}^{(0,0)} = \int_{\Omega} dV_{\mathbf{x}} \int_0^{\infty} \dot{f}(\mathbf{x}, t) dt,$$

$$\dot{f}^{(1,0)}(0) = \int_{\Omega} dV_{\mathbf{x}} \int_0^{\infty} \dot{f}(\mathbf{x}, t) \mathbf{x} dt,$$

Ω - область вне которой $\dot{f}(\mathbf{x}, t) \equiv 0$.

Аналогично временной центроид τ_c определяется формулой

$$\dot{f}^{(0,0)} \tau_c = \dot{f}^{(1,0)}(0), \quad (7)$$

где

$$\dot{f}^{(1,0)}(0) = \int_{\Omega} dV_{\mathbf{x}} \int_0^{\infty} \dot{f}(\mathbf{x}, t) t dt.$$

Продолжительность действия источника характеризуется величиной $2\Delta\tau$, где

$$(\Delta\tau)^2 = \dot{f}^{(0,2)}(\tau_c) / \dot{f}^{(0,0)}, \quad (8)$$

$$\dot{f}^{(0,2)}(\tau_c) = \int_{\Omega} dV_{\mathbf{x}} \int_0^{\infty} \dot{f}(\mathbf{x}, t) (t - \tau_c)^2 dt.$$

Пусть \mathbf{r} - единичный вектор. Средний размер очага в направлении \mathbf{r} характеризуется величиной $2d_r$, где

$$d_r^2 = \int_{\Omega} dV_{\mathbf{x}} \int_0^{\infty} \dot{f}(\mathbf{x}, t) [(\mathbf{x} - \mathbf{q}_c) \mathbf{r}]^2 dt / \int_{\Omega} dV_{\mathbf{x}} \int_0^{\infty} \dot{f}(\mathbf{x}, t) dt. \quad (9)$$

Определим матрицу \mathbf{W} :

$$\mathbf{W} = \dot{f}^{(2,0)}(\mathbf{q}_c) / \dot{f}^{(0,0)}, \quad (10)$$

$$\dot{f}^{(2,0)}(\mathbf{q}_c) = \int_{\Omega} dV_{\mathbf{x}} \int_0^{\infty} \dot{f}(\mathbf{x}, t) (\mathbf{x} - \mathbf{q}_c) (\mathbf{x} - \mathbf{q}_c)^T dt.$$

Тогда d_r^2 может быть представлено в виде квадратичной формы

$$d_r^2 = \mathbf{r}^T \mathbf{W} \mathbf{r}, \quad (11)$$

где \mathbf{r}^T - вектор, транспонированный к \mathbf{r} .

Из (11) следует, что направление максимального размера очага определяется собственным вектором матрицы W , соответствующим ее максимальному собственному значению, а направление минимального размера - собственным вектором той же матрицы, соответствующим ее минимальному собственному значению. Смешанный момент $\dot{f}^{(1,1)}$ определяет среди точек $\mathbf{x}=\mathbf{x}_0+\mathbf{v}t$, движущихся с постоянной скоростью, ту, вокруг которой поле неупругих движений $\dot{f}(\mathbf{x},t)$ сосредоточено наилучшим образом. Эта точка определяется формулами (см. [2])

$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{q}_c - \mathbf{v}\tau_c, \quad \mathbf{v} = \mathbf{w} / (\Delta\tau)^2, \quad (12)$$

где

$$\mathbf{w} = \dot{f}^{(1,1)}(\mathbf{q}_c, \tau_c) / \dot{f}^{(0,0)},$$

$$\dot{f}^{(1,1)}(\mathbf{q}_c, \tau_c) = \int_{\Omega} dV_x \int_0^{\infty} \dot{f}(\mathbf{x}, t) (\mathbf{x}-\mathbf{q}_c) (t-\tau_c) dt.$$

Следуя [4], будем называть \mathbf{v} средней скоростью мгновенного пространственного центра. Заметим, что если разрыв распространяется симметрично относительно пространственного центра очага, то $\mathbf{v}=0$; если же источник представляет собой односторонний разрыв, то \mathbf{v} - скорость его распространения.

Рассмотрим спектр i -й компоненты смещений в некоторой моде Лява или Рэлея $u_i(\mathbf{x}, \omega)$. Пусть $t=0$ - временной центр очага, а $\mathbf{y} = 0$ - его пространственный центр. Тогда справедливы равенства $\dot{f}^{(1,0)}(0,0) = \dot{f}^{(0,1)}(0,0) = 0$. Заметим, что ошибки во временном центре и в проекции пространственного центра на свободную поверхность влияют лишь на фазовый спектр смещений. Если частота ω достаточно мала, $u_i(\mathbf{x}, \omega)$ может быть представлена в виде

$$\begin{aligned} u_i(\mathbf{x}, \omega) &= \frac{1}{i\omega} M_0 M_{j1} \frac{\partial}{\partial y_1} G_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) |_{\mathbf{y}=0} + \\ &+ \frac{1}{2i\omega} \dot{f}_{mn}^{(2,0)}(0,0) M_{j1} \frac{\partial}{\partial y_m} \frac{\partial}{\partial y_n} \frac{\partial}{\partial y_1} G_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) |_{\mathbf{y}=0} - \\ &- \dot{f}_m^{(1,1)}(0,0) M_{j1} \frac{\partial}{\partial y_m} \frac{\partial}{\partial y_1} G_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) |_{\mathbf{y}=0} + \\ &+ \frac{i\omega}{2} \dot{f}^{(0,2)}(0,0) M_{j1} \frac{\partial}{\partial y_1} G_{ij}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \omega) |_{\mathbf{y}=0}. \quad (13) \end{aligned}$$

Заметим, что первый член в правой части формулы (13) описывает спектр смещений в приближении точечного мгновенного источника. Предполагается, что рассматриваемая на этом этапе частота уже не

достаточно мала, для такого приближения. Если характеристики среды известны, а координаты, время действия наилучшего мгновенного точечного источника (пространственно-временной центроид) и тензор сейсмического момента определены из более длиннопериодной части спектра смещений, то представление (13) дает нам систему линейных уравнений для моментов функции \dot{f} суммарной степени 2.

Как было отмечено выше, обычно средние фазовые медленности волн известны с недостаточной степенью точности. Поэтому мы используем для инверсии лишь амплитудные спектры поверхностных волн, зависимость которых от моментов функции \dot{f} уже нелинейна. Заметим, что в этом случае необходимой информацией о наилучшем мгновенном точечном источнике являются его глубина, тензор сейсмического момента и примерное положение эпицентра. Будем считать, что одна из двух nodal-плоскостей, определяющих фокальный механизм, может быть идентифицирована как плоскость разлома. В этом случае все моменты функции \dot{f} суммарной степени 2 могут быть выражены с помощью формул (8-12) через следующие 6 параметров:

Δt - интегральная оценка продолжительности действия источника,

d_{\max} - интегральная оценка максимального размера очага,

φ_d - угол между направлением максимального размера очага и осью простирания,

d_{\min} - интегральная оценка минимального размера очага (его направление - ортогонально к направлению максимального размера),

v - оценка абсолютного значения средней скорости мгновенного центроида v ,

φ_v - угол между v и осью простирания.

Заметим, что величина и ориентация максимального и минимального размеров очага задают собственные значения и собственные векторы матрицы $\dot{f}_{mn}^{(2,0)}$. Используя неравенство Шварца для вторых моментов функции \dot{f} , можно получить следующее неравенство, которому должны удовлетворять рассматриваемые параметры

$$v^2 \Delta t^2 (\cos^2 \varphi / d_{\max}^2 + \sin^2 \varphi / d_{\min}^2) \leq 1, \quad (14)$$

где φ - угол между направлением максимального размера очага и скоростью v .

Будем также предполагать, что скорость мгновенного центроида не может превышать скорости волны Рэлея в однородном полупространстве с теми же значениями упругих параметров, что и на глубине наилучшего точечного источника. Выберем в шестимерном пространстве опи-

санных выше искомым параметрам область возможных их значений и дискретизируем ее. Тем самым мы определим в этом пространстве сетку, узлы которой соответствуют допустимым комбинациям значений варьируемых параметров, если они удовлетворяют условию (14). Для каждого такого узла, выразив моменты функции \dot{f} через искомые параметры и используя формулу (13), определяющую действительную и мнимую части спектров смещений, можно вычислить амплитудные спектры поверхностных волн в точках наблюдения. Из сравнения вычисленных амплитудных спектров с наблюдаемыми для каждой возможной комбинации значений параметров Δt , d_{\max} , d_{\min} , φ_d , v и φ_v определим по формуле (2) нормированную амплитудную невязку. Фиксируя значение одного из варьируемых параметров, поставим ему в соответствие минимальную невязку ε при всех возможных значениях остальных параметров. Таким образом мы определим 6 функций невязки, соответствующих 6-ти варьируемым параметрам:

$$\varepsilon_{\Delta t}(\Delta t), \varepsilon_{d_{\max}}(d_{\max}), \varepsilon_{d_{\min}}(d_{\min}), \varepsilon_{\varphi_d}(\varphi_d), \varepsilon_v(v) \text{ и } \varepsilon_{\varphi_v}(\varphi_v).$$

Значение переменной, в котором соответствующая функция невязки достигает минимума, определим, как оценку этого параметра. В то же время эти функции характеризуют качество разрешения определяемых характеристик очага.

Для определения пространственно-временных характеристик очага Спитакского землетрясения были использованы амплитудные спектры фундаментальных мод Лява и Рэлея в области периодов от 30 до 60 с и приведенный выше фокальный механизм. В качестве плоскости разлома была выбрана nodальная плоскость с углом простираения 293° и углом падения 69° . Для описания среды в точках регистрации были использованы модели, приведенные в таблице. Модель 1 - для станции ANMO; модель 2 - для станций COL и LON; модель 3 - для станций KEV, WMQ, GDN, SLR, NIA, KON, LZN, KMI и MMY; для станции NON была принята модель 4.

На рис.4 представлены результаты прямого перебора возможных значений параметров. Минимумы невязок дают следующие оценки для определяемых параметров:

$$\Delta t = 10-11 \text{ с}, \quad d_{\max} = 10-15 \text{ км}, \quad d_{\min} = 0-5 \text{ км}, \quad \varphi_d = 150^\circ, \\ v = 0,8-1 \text{ км/с} \quad \text{и} \quad \varphi_v = 150^\circ$$

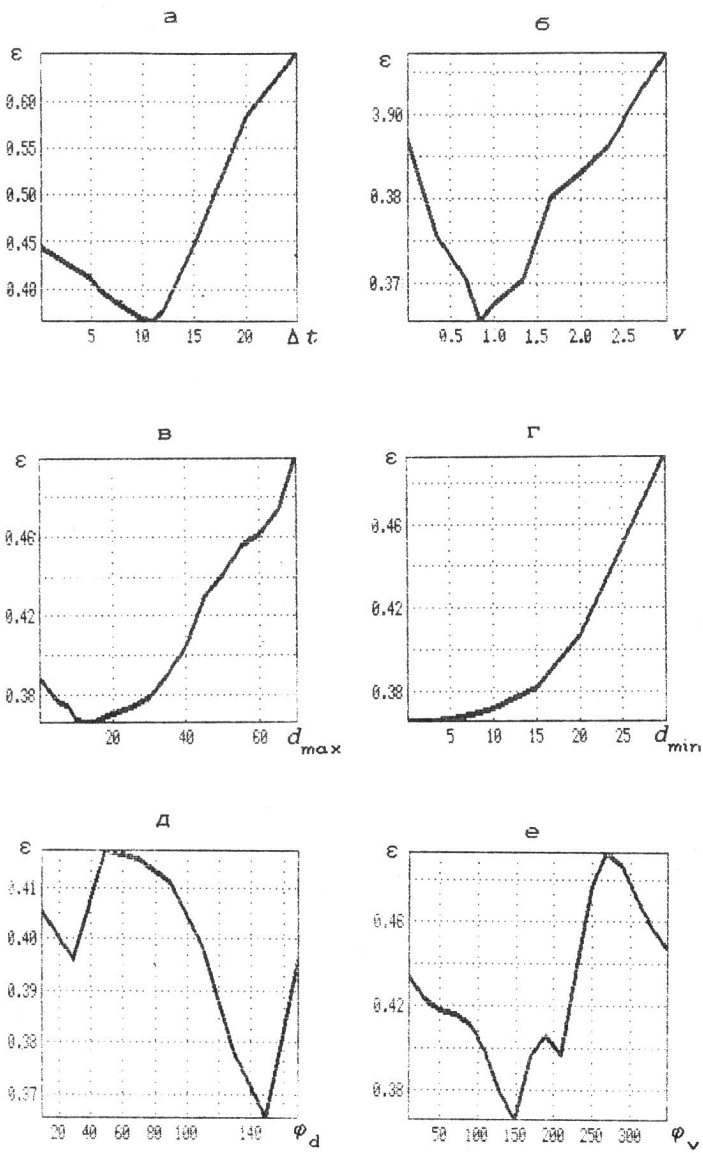
(углы отсчитываются в направлении часовой стрелки от оси простира-ния на лежащем блоке). Кривые $\varepsilon(\varphi_d)$ и $\varepsilon(\varphi_v)$ были получены при фикс-

Модели среды

Модель 1				Модель 2			
d	α	β	ρ	d	α	β	ρ
2	4,0	2,31	2,41	4	4,41	2,55	2,41
1	5,00	2,89	2,41	26	5,58	3,18	2,66
1,5	5,50	3,17	2,41	30	6,50	3,76	2,90
2	5,80	3,35	2,41	20	8,10	4,51	3,36
3	6,20	3,58	2,66	10	8,07	4,46	3,37
7	6,40	3,69	2,66	10	8,02	4,41	3,38
11	6,80	3,92	2,79	25	7,93	4,37	3,39
11,5	7,00	4,04	2,90	25	7,85	4,35	3,41
41	8,10	4,51	3,36	25	7,89	4,36	3,43
10	8,07	4,46	3,37				
10	8,02	4,41	3,38				
25	7,93	4,37	3,39				
25	7,85	4,35	3,41				
25	7,89	4,36	3,43				

Модель 3				Модель 4			
d	α	β	ρ	d	α	β	ρ
19	6,14	3,55	2,74	5	1,50	0,00	1,00
19	6,58	3,80	3,0	5	6,58	3,80	3,0
12	8,20	4,65	3,32	12	8,20	4,65	3,32
10	8,17	4,62	3,34	10	8,17	4,62	3,34
10	8,14	4,57	3,35	10	8,14	4,57	3,35
10	8,10	4,51	3,36	10	8,10	4,51	3,36
10	8,07	4,46	3,37	10	8,07	4,46	3,37
10	8,02	4,41	3,38	10	8,02	4,41	3,38
25	7,93	4,37	3,39	25	7,93	4,37	3,39
25	7,85	4,35	3,41	53	7,60	4,20	3,41
25	7,89	4,36	3,43	25	7,89	4,36	3,43

П р и м е ч а н и е . d - мощность слоя (км), α - скорость p-волн (км/с), β - скорость s-волн (км/с), ρ - плотность (г/см³).



Р и с. 4. Функции невязки для оцениваемых параметров
 а - для Δt (с), б - для v (км/с), в - для d_{\max} (км),
 г - для d_{\min} (км), д - для ϕ_d (градус), е - для ϕ_v (градус)

сированных значениях остальных параметров, соответствующих минимальным невязкам.

Следует иметь ввиду, что приведенные оценки являются интегральными характеристиками распределения интенсивности подвижки в пространстве и во времени. Так в случае Гауссовского распределения $(\Delta t/2)^2$, $(d_{\max}/2)^2$ и $(d_{\min}/2)^2$ - соответствующие дисперсии. В случае равномерного распределения интенсивности подвижки в прямоугольной области и во времени для получения оценок длительности и размеров очага значения Δt , d_{\max} и d_{\min} должны быть умножены на $\sqrt{3}$. Низкое значение скорости мгновенного центроида может быть следствием двустороннего характера распространения разрыва. Из сравнения оценок размеров очага и продолжительности его действия видно, что кажущаяся скорость распространения разрыва очень мала. Это может быть связано с остановками разрыва в процессе его развития.

Литература

1. Букчин Б.Г. Об определении параметров очага землетрясения по записям поверхностных волн в случае неточного задания характеристик среды // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1989. №9. С. 34-41.
2. Backus G., Mulcahy M. Moment tensors and other phenomenological descriptions of seismic sources. Pt.1. Continuous displacements // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1976. Vol.46. P.341-362.
3. Backus G. Interpreting the seismic glut moments of total degree two or less // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1977. Vol.51. P.1-25.
4. Букчин Б.Г. Оценки временных и геометрических характеристик очага землетрясения по пространственно-временным моментам тензора избыточных напряжений // Математические методы в сейсмологии и геодинимике. М.: Наука, 1986. С.145-155. (Вычисл. сейсмология; Вып. 19).