

УДК 550.348(100)

СЕЙСМОЛОГИЯ

А. М. Аветисян, И. П. Добровольский

Об одном алгоритме определения координат гипоцентра  
 землетрясения с помощью ЭВМ

(Представлено академиком АН Армянской ССР А. Г. Назаровым 18/IV 1980)

Исследование сейсмичности отдельных районов и, в частности, изучение распределения очагов в пространстве и сейчас остается важнейшей задачей сейсмологии. К этому нужно добавить, что количественный анализ процессов в очаговой области должен также базироваться на знании положения гипоцентра.

Обычно положение очагов землетрясений определяется по инструментальным данным способом засечек (1-3) с использованием наблюдений ряда сейсмических станций. При массовой обработке привлекаются современные вычислительные средства. Применение ЭВМ открывает новые возможности, позволяя пойти по пути использования математически более сложных алгоритмов, обладающих, однако, более высокой точностью и удобством в работе.

В статье предлагается новый алгоритм, основанный на идее метода засечек, но отличающийся от него известными достоинствами. Во-первых, все формулы построены в географической (сферической) системе координат, что удобно для ввода исходной и анализа выходной информации. Во-вторых, расстояние между двумя пунктами на поверхности Земли вычисляется по дуге большого круга. Это лучше приближает траекторию, чем прямая, и, кроме того, удобно тем, что основные мировые годографы построены по дугам большого круга. В алгоритме используется метод наименьших квадратов, приводящий к системе трансцендентных уравнений, и производится определение глубины очага минимизацией исходного функционала.

Расстояние между двумя точками на поверхности Земли по дуге большого круга, в предположении, что Земля является шаром, выражается формулой

$$l = 2R \arcsin \sqrt{\frac{1 - \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos \Delta\lambda - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2}{2}}$$

где  $R$  — радиус Земли,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  — широты пунктов,  $\Delta_1$  — разность долгот.

Здесь северной и южной широтам, как и западной и восточной долготам, приписываются разные знаки, конкретный выбор которых не отражается на результате.

Суть алгоритма состоит в минимизации функционала

$$u(\lambda, \varphi) = \sum_{i=1}^N (l_i - \Delta_i)^2 = \\ = \sum_{i=1}^N \left( 2R \arcsin \sqrt{\frac{1 - \cos \varphi \cos \varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i) - \sin \varphi \sin \varphi_i}{2}} - \Delta_i \right)^2, \quad (1)$$

где  $N$  — число сейсмических станций,  $\lambda_i, \varphi_i$  — координаты  $i$ -й станции,  $\lambda, \varphi$  — координаты эпицентра,  $\Delta_i$  — расстояние от  $i$ -й станции до эпицентра.

Расстояния  $\Delta_i$  вычисляются следующим образом. Исходя из характера сейсмических волн выбирается соответствующая пара уравнений годографов, например,

$$t_{p_i} = \sqrt{\frac{\Delta_i^2 + h^2}{V_p^2}}; \quad t_{s_i} = \sqrt{\frac{\Delta_i^2 + h^2}{V_s^2}}. \quad (2)$$

Из этой системы уравнений можно определить  $\Delta_i$  по известной разности времен  $t_{p_i} - t_{s_i}$ , если известна величина глубины гипоцентра  $h$ .

Зададим некоторую величину  $h = h_1$ . Тогда, определяя из (2)  $\Delta_i$ , можно составить функционал (1), условия минимума которого по  $\lambda, \varphi$  дают систему

$$\partial u / \partial \varphi = 0; \quad \partial u / \partial \lambda = 0$$

или в развернутом виде

$$\sum_{i=1}^N (l_i - \Delta_i) \frac{\partial l_i}{\partial \varphi} = 0; \\ \sum_{i=1}^N (l_i - \Delta_i) \frac{\partial l_i}{\partial \lambda} = 0, \quad (3)$$

где

$$\frac{\partial l_i}{\partial \varphi} = R \frac{\sin \varphi \cos \varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i) - \cos \varphi \sin \varphi_i}{\sqrt{1 - (\cos \varphi \cos \varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i) + \sin \varphi \sin \varphi_i)^2}}, \\ \frac{\partial l_i}{\partial \lambda} = R \frac{\cos \varphi \cos \varphi_i \sin(\lambda - \lambda_i)}{\sqrt{1 - (\cos \varphi \cos \varphi_i \cos(\lambda - \lambda_i) + \sin \varphi \sin \varphi_i)^2}}$$

Система (3) имеет структуру

$$G(\lambda, \varphi) = 0; \\ F(\lambda, \varphi) = 0$$

и может быть решена либо методом линейной аппроксимации, либо методом Ньютона, где последовательные приближения вычисляются по формулам (при  $f(\lambda, \varphi) \neq 0$ )

$$\lambda_{n+1} = \lambda_n - \frac{1}{f(\lambda_n, \varphi_n)} \left| \begin{array}{cc} G(\lambda_n, \varphi_n) & G'_\varphi(\lambda_n, \varphi_n) \\ F(\lambda_n, \varphi_n) & F'_\varphi(\lambda_n, \varphi_n) \end{array} \right|$$

$$\varphi_{n+1} = \varphi_n - \frac{1}{f(\lambda_n, \varphi_n)} \left| \begin{array}{cc} G(\lambda_n, \varphi_n) & G'_\lambda(\lambda_n, \varphi_n) \\ F(\lambda_n, \varphi_n) & F'_\lambda(\lambda_n, \varphi_n) \end{array} \right|$$

причем

$$f(\lambda, \varphi) = \left| \begin{array}{cc} G_\lambda(\lambda, \varphi) & G'_\varphi(\lambda, \varphi) \\ F_\lambda(\lambda, \varphi) & F'_\varphi(\lambda, \varphi) \end{array} \right|$$

В качестве нулевого приближения в этом итерационном процессе берется решение системы

$$I_k = \Delta_k$$

$$I_m = \Delta_m$$

для какой-нибудь пары станций с номерами  $k$  и  $m$ . От начального приближения зависит в немалой степени быстрота сходимости итераций, поэтому выбор этой пары должен производиться достаточно продуманно.

В результате всей процедуры будут найдены координаты эпицентра  $(\lambda_1, \varphi_1)$  для принятой при решении системы (2)  $h = h_1$ , т. е. координаты гипоцентра  $(\lambda_1, \varphi_1, h_1)$ . Повторяя этот процесс для других глубин, получим множество координат гипоцентра  $(\lambda_j, \varphi_j, h_j)$ . Если для каждой тройки координат  $(\lambda_j, \varphi_j, h_j)$  вычислить значение функционала  $u$  по формулам (1), (2), то получим множество  $u = \{u_j\}$ , которое, в сущности, является множеством величин, характеризующих сравнительную погрешность. Искомыми координатами будут координаты  $(\lambda_k, \varphi_k, h_k)$ , соответствующие минимальному элементу  $u_k$  множества  $u$ .

Описанный алгоритм был реализован на языке «Алгол-60» и вычисления были проведены на машине «Минск-22». Ряд землетрясений Кавказа обработан тремя методами: два первых—ручные, третий—по вышеизложенному алгоритму. Согласие между тремя методами удовлетворительное. Однако отсутствие точных решений затрудняет отдать предпочтение какому-либо одному методу. Можно предложить два способа проверки: экспериментальный (более дорогой и трудоемкий) и теоретический. В первом случае можно было бы взорвать заряд в скважине и, зафиксировав сеть станций сейсмические волны от этого события, обработать полученные данные. Во втором способе строится математическая модель явления.

Нужно отметить, что в настоящее время такой численный эксперимент легко осуществить для среды с любым заданным распределением скоростей, а пользу он принесет немалую.

Институт геофизики и  
инженерной сейсмологии  
Академии наук Армянской ССР

Հաշվիչ մեխենայի օգնությամբ երկրաշարժի կոորդինատների որոշման մի  
ալգորիթմի մասին

Տարածության մեջ երկրաշարժի կոորդինատների տեղաբաշխման խըն-  
դիրը հանդիսանում է սեյսմոլոգիայի կարևորագույն խնդիրներից մեկը:

Հոդվածում նշված ալգորիթմը հնարավորություն է տալիս հաշվիչ մե-  
քենայի օգնությամբ՝ օգտագործելով երկրաշարժի տեղաբաշխման մաթեմա-  
տիկական մոդելը, ստանալ կոորդինատներ ավելի մեծ ճշտությամբ՝ համե-  
մատած սեյսմիկ ինֆորմացիայի ձևոք մշակման հետ, որը կարելի է օգտա-  
գործել տվյալ միջավայրի և արագությունների ցանկացած ձևով տրման  
դեպքում:

Տրված ալգորիթմի համար կազմված է ծրագիր «Մինսկ-22» մեքենայի  
համար և մշակված են մի շարք երկրաշարժեր, որոնց էպիկենտրոնները գրտ-  
նրվում են Կովկասում: Ստացված արդյունքները համարյա թե չեն տարբեր-  
վում Կովկասի համար երկրաշարժերի տեղաբաշխման կատալոգի մեջ տրված  
արդյունքներից:

ЛИТЕРАТУРА — ԿՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

Н. А. Введенская, Труды геофизического ин-та АН СССР, № 30(157). \* В. И. Уломов и др., Автоматизация сбора и обработки сейсмической информации, «ФАН», Ташкент, 1976. \* Н. С. Бахвалов, Численные методы, «Наука», М., 1973.