

ПРИМЕНЕНИЕ
ЭВМ
В СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ
ПРАКТИКЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ЕССН

«НАУКА»

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

МЕЖДУВЕДОМСТВЕННЫЙ СОВЕТ ПО СЕЙСМОЛОГИИ
И СЕЙСМОСТОЙКОМУ СТРОИТЕЛЬСТВУ
ПРИ ПРЕЗИДИУМЕ АН СССР

ОРДЕНА ЛЕНИНА ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ЗЕМЛИ им. О.Ю. ШМИДА

ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ В СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ ПРАКТИКЕ

МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ЕССН

Ответственные редакторы:

доктор физико-математических наук,
профессор *Н.В. Кондорская*

доктор физико-математических наук
Б.В. Костров



МОСКВА
"НАУКА"
1985



4358

Применение ЭВМ в сейсмологической практике: Методические работы ЕССН. М.: Наука, 1985.

В сборнике приведены разработанные в последние годы алгоритмы и программы определения параметров землетрясений в сейсмологической практике, а также обработка данных опробования этих программ.

Книга является результатом работы большого коллектива сотрудников по линии ЕССН (Единая система сейсмических наблюдений СССР) и содержит важные методические материалы для сейсмологической практики. Представляет интерес для сейсмологов, геофизиков и других специалистов.

Рецензенты:

А.В. Николаев, С.Л. Соловьев

ПРЕДИСЛОВИЕ

Серьезные исследования гипоцентров в настоящее время немыслимы без использования ЭВМ. Дальнейшее развитие сейсмических сетей с цифровой регистрацией ставит нетрадиционные задачи при обработке исходных сейсмологических данных для изучения очагов землетрясений.

Тематика сборника выходит за рамки определения параметров очагов землетрясений и содержит ряд статей, отражающих современное состояние обработки данных в смежных областях. Он логически продолжает сборник "Алгоритмы и практика определения параметров гипоцентров землетрясений на ЭВМ (Методические работы ЕССН)", вышедший в 1983 г.

В первой части сборника содержатся статьи, описывающие алгоритмы, программы и результаты их использования в сейсмологической практике. Особое внимание уделяется определению параметров в ближней зоне в условиях ограниченности данных (статьи А.К. Костинского, Е.И. Поречно-вой, Б.Г. Пустовитенко; Т.А. Андреева, С.В. Мишина, Т.В. Нагорных, Л.Н. Поплавской, А.А. Поплавского, А.Т. Тотока). К новым методам относится метод определения параметров гипоцентров групповым способом (М.Б. Вертлиб).

Вопросы точности определения глубин очагов землетрясений в зависимости от ошибок во временах начала землетрясений от типов минимизируемых функционалов рассмотрены в статье Н.Б. Пивоваровой. В статье Н.Б. Пивоваровой, Л.Б. Славиной приводятся алгоритмы и результат машинного определения координат землетрясений в ближней зоне и рассчитанные таблицы площадных годографов.

Вопросы эффективности сети сейсмостанций при определении основных параметров очагов землетрясений на примере Байкальской зоны рассмотрены в статье С.И. Голенецкого. В статье С.В. Ларина, Л.Н. Поплавской, О.Н. Соловьевой, С.Л. Соловьева рассматриваются алгоритмы определения магнитудно-энергетических характеристик дальневосточных землетрясений.

Нетрадиционным вопросам обработки цифровых данных посвящена статья Д.В. Долгополова, А.И. Пасторова, где рассмотрено выделение очагового импульса, а также статья А.И. Иващенко, И.В. Краевой и др., описывающая способ предварительной обработки исходных данных для последующей интерпретации.

При уточнении параметров гипоцентров землетрясений особое внимание следует уделять вопросам интерпретации вступлений сейсмических волн. В этом отношении существенную помощь могут оказать программы расчета теоретических сейсмограмм для моделей сред, используемых в практике определения гипоцентров. В сборнике помещена также статья, содержащая алгоритмы расчета теоретических сейсмограмм (А.Г. Епифанский). Эта статья, являясь продолжением работы А.Г. Епифанского, опубликованной в предыдущем сборнике, содержит необходимые алгоритмы и некоторые примеры их использования для слоисто-однородной среды.

В сборнике также помещены статья А.Е. Шулбаева, связанная с реше-

нием обратной задачи сейсмометрии, и А.В. Ключевского, в которой рассмотрены вопросы влияния сейсмографа на реальные записи. Они также направлены на уточнение интерпретации вступлений сейсмических волн.

Приведенный цикл работ указывает на широкие возможности использования новых методов интерпретации и подчеркивает необходимость развития новых систем наблюдений.

Сборник представляет практический интерес и может способствовать более широкому распространению современных методов решения сейсмологических задач в сейсмологической практике.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ГИПОЦЕНТРОВ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ПРЯМЫХ ВОЛН

А.С. Костинский, Е.И. Поречнова, Б.Г. Пустовитенко

В регионах с неизвестным строением среды, в "новых" эпицентральных областях и районах строительства крупных промышленных объектов для определения координат гипоцентров местных землетрясений обычно используются способы, не зависящие от предварительного задания скоростей. Среда при этом, как правило, предполагается однородной и изотропной.

В основе всех таких способов лежит совместное решение уравнений

$$(r_n - r_0)^2 - V^2 (t_n - t_0)^2, n = 1, 2, \dots \quad (1)$$

относительно x_0, y_0, z_0 — компонент радиус-вектора гипоцентра r_0 , отнесенного к какой-либо координатной системе. Здесь символ V означает одну из скоростей V_p или V_s продольных или поперечных волн. Соответственно $t_n = t_n^p$ или $t_n = t_n^s$ — время вступлений волн P или S на n -й станции. Возможны два случая.

1. Считаются заданными $t_i^p, i = 1, 2, \dots; t_j^s, j = 1, 2, \dots$ — времена вступлений на $N = \max\{\max(i), \max(j)\}$ станциях и x_n, y_n, z_n — компоненты радиус-векторов этих станций в принятой системе координат. Время в очаге t_0 и отношение V_p/V_s могут быть найдены из графика Вадати, если одновременно $\max(i) > 1$ и $\max(j) > 1$. Тогда для однозначного определения вектора r_0 и скорости V_p (V_s) необходимо еще четыре значения времен t_k^p (t_k^s),

$k = 1, 2, 3, 4$. Задачу расчета параметров r_0 и V_p (V_s) по четырем известным временам вступлений однотипных (т.е. имеющих одинаковую скорость) волн и известному t_0 в дальнейшем назовем кратко задачей *A*.

2. Заданы, кроме координат станций, времена вступлений только однотипных волн. Параметры r_0, V, t_0 определяются однозначно по пяти значениям $t_m, m = 1, 2, \dots, 5$. Соответствующую задачу назовем задачей *B*.

В обоих случаях точное решение необходимого числа уравнений (1) с дополнительными условиями $|r_n|^2 = R^2, n = 1, 2, \dots, N$ (станции на сфере) или $[(r_2 - r_1)(r_3 - r_1)(r_4 - r_1)] = 0$ (станции на плоскости, $N = 4$) теоретически, т.е. без учета ошибок измерений, исчерпывает задачу. В оперативной обработке местных землетрясений долгое время использовались простые графоаналитические способы определения гипоцентров, не требующие сложных вычислительных операций. Основой этих способов служили частные свойства системы (1), а именно существование различных типов эпи- и гипоцентральных [1, 2]. С внедрением ЭВМ в практику обработки наблюдений и накоплением знаний о строении среды стали разрабатываться главным образом алгоритмы, использующие годограф. Известны только единичные программы поиска эпицентров на основе метода эпицентральных [3], но в них не предусмотрено определение глубины очага.

В настоящей статье предлагается алгоритм определения гипоцентров на основе точного решения системы (1). Радиус-вектор гипоцентра r , скорость

V и время в очаге t_0 (для задачи B) выражены в виде явных функций времен t_n , симметричных относительно координат станций. Подчеркивается, что две из этих функций, а именно глубина гипоцентра h и скорость V , могут принимать комплексные значения; приводится точная формулировка условия существования физического решения.

Используемые обозначения. В настоящей работе применяется правая декартова прямоугольная система координат; для измерения x, y, z выбрана одна и та же единица масштаба.

Имеется два основных определителя:

$$\Delta \equiv \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 \end{vmatrix}, d \equiv \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_5 \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \end{vmatrix}$$

Все остальные могут быть образованы из основных следующим образом. Добавление к символу определителя нижнего индекса $1, x, y, z, t$ означает замену в нем соответственно каждого из элементов $1_n, x_n, y_n, z_n, t_n$ на t_n^2 (n — номер столбца); добавление однотипного верхнего индекса — замену тех же элементов на t_n . Таким образом, не существуют Δ_t и Δ^t , а есть $d^t \equiv d$. Далее, замена всех t_n^2 на $|r_n|^2$ переводит $\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z, \Delta_1$ в $\mu_x, \mu_y, \mu_z, \mu_1$, а d_x, d_y, d_z, d_t, d_1 в $\nu_x, \nu_y, \nu_z, \nu_t, \nu_1$. Определители μ получаются и из $\Delta^x, \Delta^y, \Delta^z, \Delta^1$ заменой $t_n \rightarrow |r_n|^2$ (рис. 1).

При операциях со строкой t_n^2 строка t_n остается без изменения, и наоборот.

Алгебраическое дополнение элемента в определителе обозначается двумя буквами в фигурных скобках, первая из которых — символ определителя, а вторая — символ элемента. $E(\tau)$ — единичная функция Хевисайда:

$$E(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{при } \tau \geq 0 \\ 0 & \text{при } \tau < 0. \end{cases}$$

Индекс k пробегает значения $1, 2, 3, 4$; индекс m — значения $1, 2, \dots, 5$. Суммирование везде ведется по всем значениям k или m .

Решение задачи А.

В декартовой системе координат $Oxyz$, произвольным образом расположенной в пространстве, исходные уравнения будут иметь вид

$$(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2 + (z - z_k)^2 = V^2 (t_k - t_0)^2,$$

или

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2(x x_k + y y_k + z z_k) + r_k^2 = V^2 (t_k - t_0)^2, k = 1, \dots, 4. \quad (3)$$

Здесь $r_k^2 = x_k^2 + y_k^2 + z_k^2$ — квадрат расстояния до k -й станции C_k .

Заметим, что

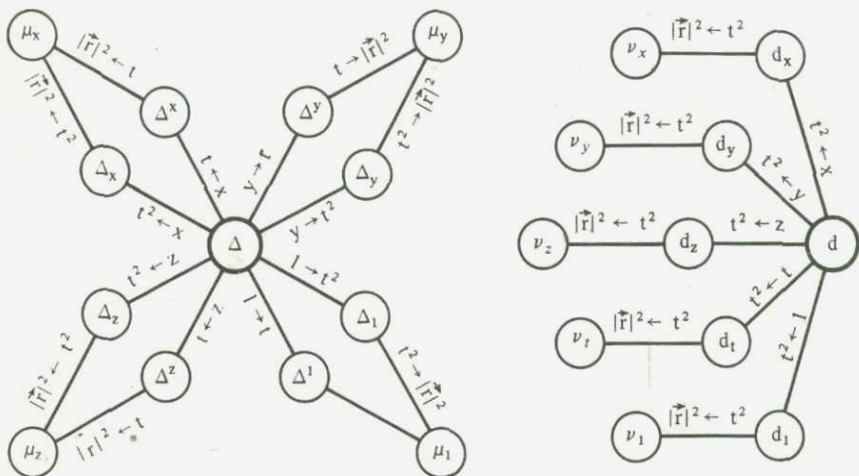
$$\Delta = \sum_k x_k \left\{ \Delta; x_k \right\} = \sum_k y_k \left\{ \Delta; y_k \right\} = \sum_k z_k \left\{ \Delta; z_k \right\}.$$

В то же время

$$\sum_k \left\{ \Delta; x_k \right\} = \sum_k \left\{ \Delta; y_k \right\} = \sum_k \left\{ \Delta; z_k \right\} = 0$$

(это определители 4-го порядка, имеющие две одинаковые строки из единиц);

$$\sum_k y_k \left\{ \Delta; x_k \right\} = \sum_k x_k \left\{ \Delta; y_k \right\} = 0, \sum_k z_k \left\{ \Delta; x_k \right\} = \sum_k x_k \left\{ \Delta; z_k \right\} = 0, \dots$$



Р и с. 1. Схема построения определителей

(это определители 4-го порядка, имеющие две одинаковые строки из координат).

Учитывая эти соотношения, составим линейную комбинацию k уравнений (3) сначала с коэффициентами $\{\Delta; x_k\}$, затем с $\{\Delta; y_k\}$ и $\{\Delta; z_k\}$. Получим

$$\left\{ \begin{aligned} 2x &= -\frac{1}{\Delta} [V^2 \sum_k (t_k - t_0)^2 \{\Delta; x_k\} - \sum_k r_k^2 \{\Delta; x_k\}] = -V^2 \frac{\Delta_x - 2t_0 \Delta^x}{\Delta} + \frac{\mu_x}{\Delta}, \\ 2y &= -\frac{1}{\Delta} [V^2 \sum_k (t_k - t_0)^2 \{\Delta; y_k\} - \sum_k r_k^2 \{\Delta; y_k\}] = \\ &= -V^2 \frac{\Delta_y - 2t_0 \Delta^y}{\Delta} + \frac{\mu_y}{\Delta}, \\ 2z &= -\frac{1}{\Delta} [V^2 \sum_k (t_k - t_0)^2 \{\Delta; z_k\} - \sum_k r_k^2 \{\Delta; z_k\}] = -V^2 \frac{\Delta_z - 2t_0 \Delta^z}{\Delta} + \frac{\mu_z}{\Delta}. \end{aligned} \right. \quad (4)$$

Найденные x, y, z будут решением системы (3), т.е. искомыми x_0, y_0, z_0 . Подставим (4) в (3):

$$\begin{aligned} & \frac{[V^2 (\Delta_x - 2t_0 \Delta^x) - \mu_x]^2 + [V^2 (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y) - \mu_y]^2 + [V^2 (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z) - \mu_z]^2}{4\Delta^2} + \\ & + \frac{x_k [V^2 (\Delta_x - 2t_0 \Delta^x) - \mu_x] + y_k [V^2 (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y) - \mu_y] + z_k [V^2 (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z) - \mu_z]}{\Delta} = \\ & = V^2 (t_k - t_0)^2 - r_k^2. \end{aligned}$$

Но для любого $k = 1, 2, 3, 4$ справедливы тождества

$$\begin{aligned} x_k \Delta_x + y_k \Delta_y + z_k \Delta_z &= \Delta t_k^2 - \Delta_1, \\ x_k \Delta^x + y_k \Delta^y + z_k \Delta^z &= \Delta t_k - \Delta^1, \\ x_k \mu_x + y_k \mu_y + z_k \mu_z &= \Delta r_k^2 - \mu_1, \end{aligned} \quad (5)$$

представляющие собой разложения по 5-му столбцу определителей

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ t_1^2 & t_2^2 & t_3^2 & t_4^2 & t_k^2 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_k \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_k \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_k \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & r_k \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_k \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_k \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_k \end{vmatrix}, \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ r_1^2 & r_2^2 & r_3^2 & r_4^2 & r_k^2 \\ x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_k \\ y_1 & y_2 & y_3 & y_4 & y_k \\ z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_k \end{vmatrix},$$

тождественно равных нулю. Кроме того, четыре станции C_k лежат на сфере радиуса R ; этот факт не зависит от выбора координатной системы. Поэтому

$$r_k^2 - 2(x_k x_c + y_k y_c + z_k z_c) + r_c^2 = R^2, \quad k = 1, 2, 3, 4,$$

где $r_c = \{x_c, y_c, z_c\}$ — радиус-вектор центра сферы. Разрешим эти четыре уравнения относительно $2x_c, 2y_c, 2z_c, r_c^2$ (считая их независимыми). По теореме Крамера

$$2x_c = \mu_x / \Delta, \quad 2y_c = \mu_y / \Delta, \quad 2z_c = \mu_z / \Delta, \quad r_c^2 = R^2 - \mu_1 / \Delta. \quad (5a)$$

Тогда из тождества $r_c^2 \equiv x_c^2 + y_c^2 + z_c^2$ следует, что

$$(\mu_x^2 + \mu_y^2 + \mu_z^2) / 4\Delta^2 = R^2 - \mu_1 / \Delta.$$

Окончательно имеем

$$\begin{aligned} \sqrt{4} \left[\frac{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)^2}{4\Delta^2} \right] &= -R^2 + \\ + \sqrt{2} \left[\frac{\mu_x (\Delta_x - 2t_0 \Delta^x) + \mu_y (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y) + \mu_z (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)}{2\Delta^2} + \frac{\Delta_1 - 2t_0 \Delta^1}{\Delta} + t_0^2 \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Это инвариантное условие единственности решения системы (3), позволяющее найти скорость V . Если V^2 удовлетворяет квадратному уравнению (6), то координаты гипоцентра определяются по (4).

В дальнейшем удобно поместить начало координат O в центр Земли. Точка $(0, 0, R)$ пусть совпадает с Северным полюсом, точка $(R, 0, 0)$ — с точкой пересечения нулевого меридиана и экватора. Введем сферические координаты станций, связанные с декартовыми обычным образом:

$$x_k = R \sin \theta_k \cos \psi_k;$$

$$y_k = R \sin \theta_k \sin \psi_k;$$

$$z_k = R \cos \theta_k;$$

$$x_k^2 + y_k^2 + z_k^2 = R^2, \quad 0 \leq \theta_k \leq \pi, \quad -\pi < \psi_k \leq \pi, \quad k = 1, 2, 3, 4.$$

Тройке чисел x_0, y_0, z_0 , определяющих гипоцентр S , теперь можно поставить в соответствие $R-h, \theta_0, \psi_0$ (h — глубина очага).

Значения угла $-\pi < \psi \leq 0$ соответствуют географической западной долготе $\lambda = \psi$, значения $0 \leq \psi \leq \pi -$ восточной долготе $\lambda = -\psi$. Интервал полярных расстояний $0 \leq \theta \leq \pi/2$ соответствует северной широте $\varphi = \pi/2 - \theta$, интервал $\pi/2 \leq \theta \leq \pi$ — южной широте $\varphi = \theta - \pi/2$.

В выбранной специальной системе координат μ_x, μ_y, μ_z обращаются в нуль, а формулы (4) и (6) упрощаются:

$$2x_0 = -V^2 \frac{\Delta_x - 2t_0 \Delta^x}{\Delta}; \quad 2y_0 = -V^2 \frac{\Delta_y - 2t_0 \Delta^y}{\Delta}; \quad 2z_0 = -V^2 \frac{\Delta_z - 2t_0 \Delta^z}{\Delta}; \quad (7)$$

$$V^4 \left[\frac{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)^2}{4\Delta^2} \right] = \quad (8)$$

$$= V^2 \left[\frac{\Delta_1 - 2t_0 \Delta^1}{\Delta} + t_0^2 \right] - R^2.$$

Находим сферические координаты гипотцентра:

$$|r_0| \equiv r_0 = R - h = (V^2/2|\Delta|) \sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)^2}; \quad (9)$$

$$\cos \psi_0 = - \frac{|\Delta|}{\Delta} \frac{\Delta_x - 2t_0 \Delta^x}{\sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2}}; \quad (10)$$

$$\sin \psi_0 = - \frac{|\Delta|}{\Delta} \frac{\Delta_y - 2t_0 \Delta^y}{\sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2}};$$

$$\cos \theta_0 = - \frac{|\Delta|}{\Delta} \frac{\Delta_z - 2t_0 \Delta^z}{\sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)^2}}; \quad (11)$$

$$\sin \theta_0 = \frac{\sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2}}{\sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)^2}};$$

$$\psi_0 = \arctg \left[\frac{\Delta_y - 2t_0 \Delta^y}{\Delta_x - 2t_0 \Delta^x} \right] + \pi \operatorname{sign}(\sin \psi_0) E(-\cos \psi_0);$$

$$\theta_0 = \arctg \left[- \frac{|\Delta|}{\Delta} \frac{\sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2}}{\Delta_z - 2t_0 \Delta^z} \right] + \pi E(-\cos \theta_0); \quad (12)$$

$$(-\pi < \psi_0 \leq \pi, \quad 0 \leq \theta_0 \leq \pi).$$

В этих формулах $\Delta \neq 0$. В противном случае четыре станции должны лежать в одной плоскости — секущей плоскости к сфере, а следовательно, на окружности, что практически не реализуется.

Угловое расстояние от эпицентра P до k -й станции равно $(1/R) \widehat{PC}_k$, где \widehat{PC}_k — длина дуги. Воспользуемся (10), (11) и формулой расстояния между двумя точками на сфере:

$$\cos \frac{PC_k}{R} = \sin \theta_0 \sin \theta_k \cos(\psi_0 - \psi_k) + \cos \theta_0 \cos \theta_k =$$

$$= - \frac{|\Delta|}{\Delta} \frac{[x_k(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x) + y_k(\Delta_y - 2t_0 \Delta^y) + z_k(\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)]}{R \sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)^2}}.$$

В силу тождеств (5)

$$\cos \frac{PC_k}{R} = - \frac{|\Delta|}{\Delta} \frac{[\Delta(T_k^2 - t_0^2) - (\Delta_1 - 2t_0 \Delta^1)]}{R \sqrt{(\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)^2}}. \quad (13)$$

Здесь $T_k \equiv t_k - t_0$ — времена пробега. Теорема косинусов, примененная к ΔOSC_k , дает

$$R^2 + (R-h)^2 - 2R(R-h) \cos \frac{PC_k}{R} = (VT_k)^2.$$

Подставим сюда $\cos\left(\frac{1}{R}\widehat{PC}_k\right)$ из (13); перенесем h^2 вправо и разделим на $1-h/R$:

$$2R^2 \left[1 + \frac{|\Delta|}{\Delta} \frac{\Delta(T_k^2 - t_0^2) - (\Delta_1 - 2t_0\Delta^1)}{R\sqrt{(\Delta_x - 2t_0\Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0\Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0\Delta^z)^2}} \right] = \quad (14)$$

$$= \frac{(VT_k)^2 - h^2}{1 - h/R}$$

Слева стоит $2R^2\left(1 - \cos\frac{\widehat{PC}_k}{R}\right) = \left(2R\sin\frac{\widehat{PC}_k}{2R}\right)^2 = (PC_k)^2$ — квадрат расстояния (по хорде) между эпицентром и станцией C_k .

Умножим (14) на $\{\Delta^1; t_k\}$ и просуммируем по k :

$$\left(1 - \frac{h}{R}\right)^2 = \frac{V^2}{R^2} \left(\frac{\Delta_1 - 2t_0\Delta^1}{\Delta} + t_0^2 \right) - 1, \quad (15)$$

т.е. следствие из (8) и (9), в свою очередь, вытекает из (14). С другой стороны, умножение (14) на любую из величин $\{\Delta^x; t_k\}, \{\Delta^y; t_k\}, \{\Delta^z; t_k\}$ и последующее суммирование по k дает (9). Поэтому из четырех уравнений (14), определяющих V и h , только два независимых, как и должно быть. Возьмем, например, уравнения с индексами i, j ($1 \leq i, j \leq 4, i \neq j$). Запишем их в виде

$$h^2 + (1-h/R)(PC_i)^2 = (VT_i)^2;$$

$$h^2 + (1-h/R)(PC_j)^2 = (VT_j)^2.$$

Разделим одно на другое, исключив V :

$$h^2(T_i^2 - T_j^2) + (1-h/R)[T_i^2(PC_j)^2 - T_j^2(PC_i)^2] = 0.$$

Отсюда $h^2 = (1-h/R)\alpha$, или, пренебрегая $(h/R)^2$ по сравнению с единицей,

$$h = \frac{\sqrt{\alpha}}{1 + \sqrt{\alpha/2R}}. \quad (16)$$

Квадрат скорости волн

$$V^2 = \frac{2R|\Delta|}{\sqrt{(\Delta_x - 2t_0\Delta^x)^2 + (\Delta_y - 2t_0\Delta^y)^2 + (\Delta_z - 2t_0\Delta^z)^2}} \frac{1 - \sqrt{\alpha/2R}}{1 + \sqrt{\alpha/2R}}. \quad (17)$$

Здесь обозначено

$$\alpha \equiv \frac{(T_j PC_i)^2 - (T_i PC_j)^2}{T_i^2 - T_j^2} = 2R^2 \left[-1 + \frac{|\Delta|}{\Delta} \frac{\Delta_1 - 2t_0\Delta^1 + t_0^2\Delta}{R\sqrt{(\Delta_x - 2t_0\Delta^x)^2 + \dots}} \right]. \quad (18)$$

Из (12), (16) и (17) следует, что эпицентр существует при любых заданных временах вступлений $t_k, k = 1, 2, 3, 4$; в то же время глубину и квадрат скорости можно найти лишь при выполнении условия $\alpha \geq 0$.

Эпицентр, определяемый по (4), совпадает с точкой пересечения "прямолинейных" эпицентральных, которые в данном случае представляют собой окружности больших кругов. Это утверждение носит инвариантный характер, и поэтому достаточно проверить его в "специальной" системе координат, т.е. для формул (7). Возьмем любые три уравнения системы (3) при



Рис. 4. Карта-схема пространственного расположения групп землетрясений Северо-Муровского района с 1 января по 15 апреля 1979 г. (обозначения см. на рис. 2 и 3)

$|r_k|^2 = R^2$, например для $k = 1, 2, 3$. Исключим, как это описано в [3], вычитанием и делением h и V :

$$\frac{x(x_2-x_1) + y(y_2-y_1) + z(z_2-z_1)}{x(x_3-x_1) + y(y_3-y_1) + z(z_3-z_1)} = \frac{t_1-t_2}{t_1-t_3} \frac{t_1+t_2-2t_0}{t_1+t_3-2t_0}$$

или после преобразования:

$$x \{ \Delta_y; z_4 \} - 2t_0 \{ \Delta^y; z_4 \} + y \{ \Delta_z; x_4 \} - 2t_0 \{ \Delta^z; x_4 \} + z \{ \Delta_x; y_4 \} - 2t_0 \{ \Delta^x; y_4 \} = 0, \quad (19)$$

где x, y, z отнесены к $R-h, x^2 + y^2 + z^2 = 1$.

Отсюда заменой индекса 4 на 1, 2, 3 получаются уравнения эпицентральной, соответствующих остальным тройкам станций. Вместе с (19), таким образом, имеем линейную систему относительно x, y, z , матрица коэффициентов которой есть

$$A = \begin{pmatrix} \{ \Delta_y - 2t_0 \Delta^y; z_1 \} & \{ \Delta_z - 2t_0 \Delta^z; x_1 \} & \{ \Delta_x - 2t_0 \Delta^x; y_1 \} \\ \{ \Delta_y - 2t_0 \Delta^y; z_2 \} & \{ \Delta_z - 2t_0 \Delta^z; x_2 \} & \{ \Delta_x - 2t_0 \Delta^x; y_2 \} \\ \{ \Delta_y - 2t_0 \Delta^y; z_3 \} & \{ \Delta_z - 2t_0 \Delta^z; x_3 \} & \{ \Delta_x - 2t_0 \Delta^x; y_3 \} \\ \{ \Delta_y - 2t_0 \Delta^y; z_4 \} & \{ \Delta_z - 2t_0 \Delta^z; x_4 \} & \{ \Delta_x - 2t_0 \Delta^x; y_4 \} \end{pmatrix}$$

В силу того, что тождественно

$$\sum_k \{ \Delta_y - 2t_0 \Delta^y; z_k \} = \sum_k \{ \Delta_z - 2t_0 \Delta^z; x_k \} = \sum_k \{ \Delta_x - 2t_0 \Delta^x; y_k \} = 0,$$

$$\sum_k T_k^2 \{ \Delta_y - 2t_0 \Delta^y; z_k \} = \sum_k T_k^2 \{ \Delta_z - 2t_0 \Delta^z; x_k \} = \sum_k T_k^3 \{ \Delta_x - 2t_0 \Delta^x; y_k \} = 0,$$

матрица A имеет только две линейно-независимых строки. Следовательно, $\text{rang } A = 2$ и достаточно любых двух уравнений типа (19), т.е. двух троек станций, пусть это тройки

C_2, C_3, C_4 и C_1, C_3, C_4 , тогда

$$x \{ \Delta_y - 2t_0 \Delta^y; z_1 \} + y \{ \Delta_z - 2t_0 \Delta^z; x_1 \} + z \{ \Delta_x - 2t_0 \Delta^x; y_1 \} = 0;$$

$$x \{ \Delta_y - 2t_0 \Delta^y; z_2 \} + y \{ \Delta_z - 2t_0 \Delta^z; x_2 \} + z \{ \Delta_x - 2t_0 \Delta^x; y_2 \} = 0.$$

Разрешим относительно x/z и y/z , что главный и вспомогательные определители системы равны $(T_4^2 - T_3^2) (\Delta_z - 2t_0 \Delta^z)$, $(T_4^2 - T_3^2) (\Delta_x - 2t_0 \Delta^x)$, $(T_4^2 - T_3^2) (\Delta_y - 2t_0 \Delta^y)$, т.е. возвращаемся к следствию из (7), "нечувствительному", в отличие от (7), к замене знаков координат $x \rightarrow -x, y \rightarrow -y, z \rightarrow -z$. Это означает, что совместное решение уравнений эпицентральной не позволяет, как и следовало ожидать, выделить среди двух точек их пересечения на сфере реальный эпицентр.

Решение задачи В.

В произвольной декартовой системе координат исходные уравнения будут иметь вид

$$(x - x_m)^2 + (y - y_m)^2 + (z - z_m)^2 = V^2 (t_m - t)^2, \quad m = 1, 2, \dots, 5,$$

или

$$x^2 + y^2 + z^2 - (Vt)^2 - 2(xx_m + yy_m + zz_m - VtVt_m) + r_m^2 = (Vt_m)^2. \quad (20)$$

Здесь по-прежнему $r_m^2 \equiv x_m^2 + y_m^2 + z_m^2$. Заметим, что $d = \sum_m x_m \{d; x_m\} = \sum_m y_m \{d; y_m\} = \sum_m z_m \{d; z_m\} = \dots$ В то же время

$$\sum_m \{d; x_m\} = \dots = \sum_m \{d; t_m\} = 0; \quad \sum_m x_m \{d; y_m\} = \sum_m y_m \{d; x_m\} = 0, \dots$$

(это определители 5-го порядка, имеющие две одинаковые строки). Учитывая эти соотношения, составим линейную комбинацию m уравнений (20) сначала с коэффициентами $\{d; x_m\}$, затем с $\{d; y_m\}$, $\{d; z_m\}$, $\{d; t_m\}$. Получим

$$\begin{aligned} 2x &= -\frac{1}{d} [V^2 \sum_m t_m^2 \{d; x_m\} - \sum_m r_m^2 \{d; x_m\}] = -V^2 \frac{d_x}{d} + \frac{v_x}{d}; \\ 2y &= -\frac{1}{d} [V^2 \sum_m t_m^2 \{d; y_m\} - \sum_m r_m^2 \{d; y_m\}] = -V^2 \frac{d_y}{d} + \frac{v_y}{d}; \\ 2z &= -\frac{1}{d} [V^2 \sum_m t_m^2 \{d; z_m\} - \sum_m r_m^2 \{d; z_m\}] = -V^2 \frac{d_z}{d} + \frac{v_z}{d}; \\ 2V^2 t &= \frac{1}{d} [V^2 \sum_m t_m^2 \{d; t_m\} - \sum_m r_m^2 \{d; t_m\}] = V^2 \frac{d_t}{d} - \frac{v_t}{d}. \end{aligned} \quad (21)$$

Найденные x, y, z, t будут решением системы (20), т.е. искомыми x_0, y_0, z_0, t_0 , если при подстановке в (20) обратят в тождество каждое из уравнений этой системы. Подставим (21) в (20):

$$\begin{aligned} &\frac{1}{4d^2} \left[(V^2 d_x - v_x)^2 + (V^2 d_y - v_y)^2 + (V^2 d_z - v_z)^2 - \left(V d_t - \frac{1}{V} v_t \right)^2 \right] + \\ &+ r_m^2 + \frac{1}{d} \left[x_m (V^2 d_x - v_x) + y_m (V^2 d_y - v_y) + z_m (V^2 d_z - v_z) + \right. \\ &\left. + V^2 t_m \left(d_t - \frac{v_t}{V^2} \right) \right] = (V t_m)^2. \end{aligned}$$

Но для любого $m = 1, 2, \dots, 5$ справедливы тождества

$$x_m d_x + y_m d_y + z_m d_z + t_m d_t = d t_m^2 - d_1,$$

$$x_m v_x + y_m v_y + z_m v_z + t_m v_t = d r_m^2 - v_1,$$

которые представляют собой разложения определителей 6-го порядка по элементам одного из двух одинаковых столбцов. Кроме того, пять станций C_m лежат на сфере радиуса R и, следовательно, их координаты должны удовлетворять двум независимым инвариантным соотношениям. Проще всего получить их из равенств

$$r_m^2 - 2(x_m x_c + y_m y_c + z_m z_c) + r_c^2 = R^2, \quad m = 1, 2, \dots, 5.$$

Умножаем на $\{d; x_m\}$ и суммируем по m ; то же с $\{d; y_m\}$ и $\{d; z_m\}$:

$$2x_c = v_x/d, \quad 2y_c = v_y/d, \quad 2z_c = v_z/d. \quad (21a)$$

Умножаем на $\{v_1; r_m^2\}$ и суммируем по m :

$$v_1 + (r_c^2 - R^2)d = 0, \quad r_c^2 = R^2 - v_1/d.$$

Тогда из тождества $r_c^2 \equiv x_c^2 + y_c^2 + z_c^2$ следует, что

$$(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)/4d^2 = R^2 - v_1/d.$$

Умножая на любую из величин $\{v_t; x_m\}$, $\{v_t; y_m\}$, $\{v_t; z_m\}$ и суммируя по m , каждый раз получаем $v_t = 0$. Окончательно имеем

$$V^4 \left[\frac{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}{4d^2} \right] = V^2 \left[\frac{2(d_x v_x + d_y v_y + d_z v_z) + d_t^2}{4d^2} + \frac{d_1}{d} \right] - R^2. \quad (22)$$

Это условие единственности решения системы (20), позволяющее найти скорость V . Если V^2 удовлетворяет квадратному уравнению (22), то координаты гипоцентра и время в очаге определяются по (21). Продолжая дальше, можно было бы, как и в случае задачи А, получить явные выражения для ψ_0 , θ_0 , h , V . В этом, однако, нет необходимости, так как для каждого из четырех из пяти станций C_1, \dots, C_5 справедливы результаты решения задачи А; поэтому новым в (21) и (22) является фактически лишь выражение для t_0 . Это означает, что при t_0 , определяемом по (21), не только (6) совпадает с (22), но и x_0, y_0, z_0 из (4) тождественно равны x_0, y_0, z_0 из (21). Достаточно показать это на примере четверки станций C_1, C_2, C_3, C_4 . Прежде всего отметим, что центр сферы, найденный по (5а) и (21а), один и тот же, поэтому

$$v_x/d = \mu_x/\Delta, \quad v_y/d = \mu_y/\Delta, \quad v/d = \mu_z/\Delta.$$

Далее, разложим по элементам 5-го столбца d и d_t в разностях $d\Delta_1 - d_t\Delta^1$, $d\Delta_x - d_t\Delta^x$, $d\Delta_y - d_t\Delta^y$, $d\Delta_z - d_t\Delta^z$:

$$d\Delta_1 - d_t\Delta^1 = \Delta(t_5^2\Delta^1 - t_5\Delta_1) + x_5(\Delta^x\Delta_1 - \Delta^1\Delta_x) + y_5(\Delta^y\Delta_1 - \Delta^1\Delta_y) + z_5(\Delta^z\Delta_1 - \Delta^1\Delta_z), \quad d\Delta_x - d_t\Delta^x = \Delta^1\Delta_x - \Delta_1\Delta^x + \Delta(t_5^2\Delta^x - t_5\Delta_x) + \dots \quad (23)$$

Воспользовавшись результатами Приложения и вынося за скобки общий множитель Δ , найдем, что в скобках останутся d_x, d_y, d_z, d_1 и, следовательно:

$$\begin{aligned} d\Delta_x - d_t\Delta^x &= \Delta d_x, & d\Delta_y - d_t\Delta^y &= \Delta d_y, \\ d\Delta_z - d_t\Delta^z &= \Delta d_z, & d\Delta_1 - d_t\Delta^1 &= \Delta d_1. \end{aligned} \quad (24)$$

Подставив в (6) и (4) t_0 из (21) и учитывая (23) и (24), убеждаемся в справедливости высказанного утверждения.

Описание алгоритма. Время в очаге определяется тремя способами в зависимости от исходных данных.

1. При наличии вступлений только волн P на N станциях, $N \geq 5$, расчет t_0 ведется по формуле (21).

2. Если заданы t_i^p , $i = 1, 2, \dots, N_p$; t_j^s , $j = 1, 2, \dots, N_s$ и $N_p \geq 4$, $N_s \geq 4$, t_0 находится из графика Вадати — линейной зависимости между временем t^p и разностью $t^p - t^s$ на каждой станции:

$$t^p = t_0 + \beta(t^s - t^p), \quad (25)$$

где $\beta = (\gamma - 1)^{-1}$, $\gamma \equiv V_p/V_s$. Коэффициенты t_0 и β в уравнении прямой (25) рассчитываются методом ортогональной регрессии по точкам, по-

падающим в заданный доверительный интервал. Вопрос об исключении "выскакивающих" за пределы этого интервала экспериментальных точек решается с помощью эмпирических дисперсий и коэффициента корреляции. А именно, значения этих величин, рассчитанные для всех точек, сравниваются со значениями для всех точек, кроме "выскакивающей" [4]. При малом числе исходных данных ($\min\{N_p, N_s\} < 10$) этот способ отбраковки грубых выбросов неприменим. Вместо него нами используется следующий прием. Циклически осуществляется расчет ортогональной регрессии по совокупности данных с последующей отбраковкой точки, отстоящей от построенной средней прямой на максимальном расстоянии $\delta_{\max} > \delta T$. (Здесь δT — заданный доверительный интервал.) Выход из цикла происходит при $\delta_{\max} \leq \delta T$.

Дисперсия значений t_0 определяется по формулам из книги [5].

3. Если $1 < N_s < 4$, то t_0 вычисляется по формуле $t_0 = (\bar{\gamma} t^p - t^s) / (\bar{\gamma} - 1)$, в которой $\bar{\gamma}$ есть среднее по парам станций $C_i C_j$:

$$\gamma_{ij} = \frac{t_i^s - t_j^s}{t_i^p - t_j^p}, \quad \bar{\gamma} = \frac{2}{N_s(N_s - 1)} \sum_{(ij)} \gamma_{ij}.$$

В случае $N_s = 1$, γ полагается равным $\sqrt{3}$.

Исходными данными для расчета φ_0, λ_0, h и скорости V по формулам (12), (16), (17) служат времена вступления продольных волн $t_k^p, k = 1, 2, 3, 4$, определяемые обычно с большей надежностью, чем t_k^s . Используется найденное t_0 . Если $N_p > 4$, т.е. имеется избыток информации, из

N_p станций можно образовать $C_{N_p}^4 = \frac{N_p!}{4! \cdot (N_p - 4)!}$ четверок и по каждой

из них однозначно определить $\varphi_0, \lambda_0, h, V_p$. "Истинными" в этом случае будем считать средние $\bar{\varphi}_0, \bar{\lambda}_0, \bar{h}, \bar{V}_p$, при вычислении которых исключены грубые выбросы; погрешности $\delta\varphi_0, \delta\lambda_0, \delta h, \delta V_p$ полагаем равными средним квадратичным отклонениям [4].

Алгоритм предусматривает отбраковку грубых промахов (четверок) по следующим признакам.

1. Расположим станции в порядке возрастания времен вступлений. При $N_p > N_p^0$ договоримся исключать четверки, в которые не входит ни одна из первых m_0 ($m_0 < N_p$) станций этой последовательности (обозначаемой в дальнейшем M). Числовые значения m_0 и N_p^0 могут меняться в зависимости от характерных особенностей расположения очагов по отношению к системе станций и строения среды в регионе. При проверке данного алгоритма принято $m_0 = 3, N_p^0 = 10$.

При $N_p \leq N_p^0$ данный признак нами не применяется.

2. Введем в рассмотрение углы $\angle C_k P C_l$, образованные на сфере дугами больших кругов PC_k и $PC_l, k, l = 1, 2, 3, 4, k \neq l$, и абсолютные величины этих углов $\Omega_{kl} = \Omega_{lk} = |\angle C_k P C_l|$. Функция $\Omega_{kl} = \Omega(k, l)$ двузначна и не зависит от выбранного направления отсчета углов. Исключим практически маловероятный случай, когда эпицентр P лежит на линии, соединяющей станции. Тогда из двух значений Ω_{kl} , соответствующих паре индексов k, l , можно выбрать минимальное (меньшее π). Обозначим его $\min \Omega_{kl}$. Величину $\Omega \equiv \max_{(k,l)} \{\min \Omega_{kl}\}$, где максимум берется по всем сочетаниям из четырех по две, сравним с некоторым заданным $\Omega_{\text{пр}}$. Неравенство $\Omega < \Omega_{\text{пр}}$ составляет второй признак, по которому осуществ-

ствляется отбраковка данной четверки станций. Предельное значение $\Omega_{\text{пр}}$ выбирается в зависимости от существующего расположения станций в регионе. В данной работе $\Omega_{\text{пр}} = 90^\circ$ для закарпатских землетрясений и $\Omega_{\text{пр}} = 45^\circ$ для крымских.

3. Пусть имеющиеся данные о строении среды и землетрясениях в регионе позволяют заранее (до расчета средних) указать пределы изменения глубин очагов и скоростей упругих волн P , т.е. интервалы $[h_{\text{min}}, h_{\text{max}}]$ и $[(V_p)_{\text{min}}, (V_p)_{\text{max}}]$. Тогда отбраковываются четверки станций, для которых нарушаются неравенства

$$h_{\text{min}} < h < h_{\text{max}}, \quad (V_p)_{\text{min}} < V_p < (V_p)_{\text{max}}. \quad (26)$$

Если информации о строении региона недостаточно и ограничения (26) задать сразу нельзя, поступим следующим образом. Сначала грубо оценим h и V_p исходя из общих соображений. А именно, в качестве верхних пределов этих величин возьмем скорость V_p^∞ , заведомо невозможную для упругих волн, и глубину h^∞ , превышающую глубины очагов большинства известных землетрясений. (В нашей работе $V_p^\infty = 11$ км/с, $h^\infty = 600$ км.) Отбракуем четверки, для которых $V_p > V_p^\infty$ и $h > h^\infty$. После такого рода "грубой" отбраковки найдем среднее \bar{h} по оставшимся четверкам станций. Возможны два случая:

а) $0 < \bar{h} < 70$ км. Полагаем $h_{\text{min}} = 0$, $h_{\text{max}} = 70$ км, $(V_p)_{\text{min}} = 4,5$ км/с, $(V_p)_{\text{max}} = 6,5$ км/с;

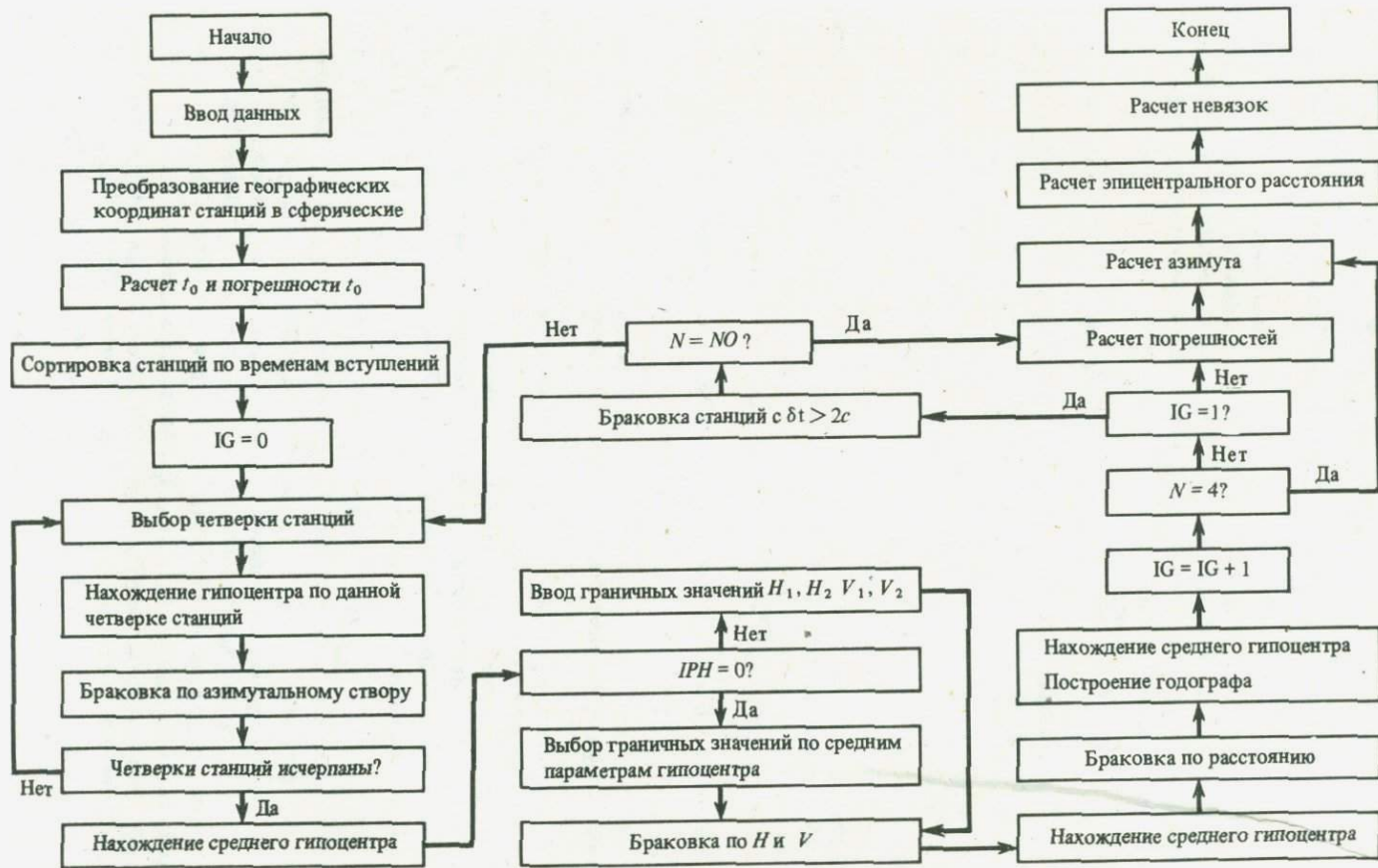
б) $70 < \bar{h} < 100$ км. Полагаем $h_{\text{min}} = 70$ км, $h_{\text{max}} = 200$ км, $(V_p)_{\text{min}} = 6,5$ км/с, $(V_p)_{\text{max}} = 8,5$ км/с.

После этого возможно провести отбраковку по (26). Проведенные здесь числовые значения характерны для Крымского и Карпатского регионов, и в других регионах могут быть иными.

4. Пусть после отбраковки по первым трем признакам найдено множество "промежуточных" гипоцентров S_q , $q = 1, 2, \dots$, и соответствующих значений скорости $(V_p)_q$. Вычислим среднюю скорость \bar{V}_p . Обозначим M_1, M_2, \dots, M_{m_0} первые m_0 членов последовательности станций M ; t_i^p , $i = 1, 2, \dots, m_0$ — времена вступлений волн P на этих станциях. Расстояния $S_q M_i$ для каждого значения q сравним с $\bar{V}_p t_i^p$. Если для данного $q |S_q M_i - \bar{V}_p (t_i^p - t_0)| > L_{\text{пр}}$ хотя бы для одного значения i , то "промежуточный" гипоцентр отбраковывается. Числовое значение $L_{\text{пр}}$ различно в разных регионах; в Крыму и Закарпатье нами принято $L_{\text{пр}} = 25$ км.

5. После описанных отбраровок найдем средний эпицентр и соответствующие эпицентральные расстояния для всех N_p станций. Методом ортогональной регрессии построим годограф и рассчитаем невязки времен пробега $\delta(t_j^p - t_0)$, $j = 1, 2, \dots, N_p$. Отбракуем станции, дающие $|\delta(t_j^p - t_0)| > \sigma$, где σ — некоторое число (максимальная допустимая невязка). Пусть их число равно n_p . С оставшимися $N_p - n_p$ станциями повторим весь цикл расчета средних φ_0 , λ_0 , h , V_p , включая отбраковки по признакам 1, 2, 3, 4.

Здесь предполагается, что годограф прямолинейный, т.е. квадратом глубины можно пренебречь по сравнению с квадратами эпицентральных расстояний. Если это условие не выполняется, необходимо вместо коэф-



Р и с. 2. Структурная схема программы

фициентов прямой искать параметры квадратичной функции [4, 5]. В данной работе $\sigma = 2$ с.

*Описание программы*¹. Изложенный алгоритм реализован в программе, написанной на языке Фортран. Приведем некоторые пояснения к структурной схеме программы (рис. 2). N обозначает число станций, на которых отмечены вступления P -волн, H — глубина очага, V — скорость волн P . После "грубой" отбраковки четверок по признаку Z вводятся граничные значения H_1, H_2, V_1, V_2 при значении управляющей переменной $IPN \neq 0$. Если пределы V и H указать невозможно, то выбор их осуществляется программно в зависимости от "предварительного" среднего значения глубины очага. Управляющая переменная IG служит для повторного выполнения расчетов после отбраковки станций по невязкам времен вступлений; NO — число станций, оставшихся после этой отбраковки. На рис. 3 показан пример обработки на ЭВМ землетрясения 24.10.1965 г. (район Закарпатья).

Опытная проверка программы. Программа прошла опытную проверку на примере расчета координат "условного очага" и параметров $t_0, \varphi, \lambda, h, V$ для реальных землетрясений Крыма, Закарпатья и Кавказа.

"Условный очаг" был задан на глубине 15 км, скорость волн полагалась равной 5 км/с, время в очаге 0 ч 0 мин 0 с. Рассчитывалось время пробега вдоль луча до четырех расположенных на сфере станций, дающих "хорошее" окружение очага. Восстановленные по полученным $t_i^P, i = 1, 2, 3, 4$, координаты "условного очага" совпали с заданными с точностью до семи значащих цифр. Отклонения не превышают 7 км при изменении t^P на $\delta t^P = \pm 0,5$ с (знаки δt^P , различны на разных станциях), t_0 на $\delta t_0 = 2$ с.

До настоящего времени глубины очагов землетрясений Закарпатья определялись только для ощутимых толчков по макросейсмическим данным, а координаты эпицентров — по способу Евсеева [6]. В Крыму применялись способы Вадати, эпицентральной, засечек и палеток изохрон [7]. Материалы обработки имеются в [8—12], *ISC* и сборнике "Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕСН СССР (Крым—Карпаты за 1980 г.)". Из этих источников взяты сведения о четырех землетрясениях района Закарпатья и восьми — Черного моря, (Крыма), шести — Кавказа с очагами в земной коре (табл. 1). Указанные землетрясения приняты в качестве контрольных при проверке алгоритма и правильности работы программы.

Как видно из таблицы, результаты расчета на ЭВМ, с одной стороны, и ручной обработки и *ISC* — с другой, находятся в хорошем согласии: в основном расхождения в определении по φ, λ и h не превышают 10 км. Исключением является землетрясение 17.04.75 г., дающее большие (до 100 км) расхождения в определении координат разными способами [12]. Широта и долгота на 13 км отличаются от данных *ISC*, однако разница в глубине составила 30 км. Вероятно, это связано с низкой точностью в определении глубин при отсутствии близких к очагу станций как в нашем случае, так и в *ISC*.

На примере Закарпатского землетрясения 24.10.65 г., для которого координаты очага определены с большой надежностью [7], проверено влияние на точность восстановления координат гипоцентров с помощью ЭВМ вариаций некоторых исходных данных: а) количества вступлений S волн; б) общего числа станций, участвующих в определении;

¹ В данном параграфе и на рис. 2 обозначения отличны от принятых в остальном тексте.



Таблица 1

Результаты сравнения данных ручной обработки с расчетами на ЭВМ

| Дата | Данные ручной обработки | | | | Расчет на ЭВМ | | |
|------------|-------------------------|---------------|---------------|----------------|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | t_0 | φ_0' | λ_0' | h_0' | t_0 | $\varphi_0 \pm \delta\varphi_0$ | $\lambda_0 \pm \delta\lambda_0$ |
| Кры м | | | | | | | |
| 21.02.61 | 00 32 36,2 | 44,50 | 34,31 | 7 | 36,2 ± 0,4 | 44,50 ± 0,02 | 34,29 ± 0,01 |
| 17.04.75 | 07 35 17 | 43,7 | 33,0 | 33 | 17,4 | 43,80 | 32,57 |
| 17.04.75* | 07 35 18,9* | 43,82* | 32,44* | 46 ± 12* | ± 0,8 | ± 0,26 | ± 0,20 |
| 4.01.80 | 14 13 10,5 | 44,56 | 34,50 | 20 | 11,0 ± ± 0,4 | 44,59 ± ± 0,05 | 34,48 ± ± 0,04 |
| 4.01.80 | 14 19 56,7 | 44,58 | 34,50 | 20 | 57,2 ± 0,4 | 44,60 ± 0,03 | 34,49 ± 0,02 |
| 18.03.80 | 17 2 21,1 | 44,61 | 34,96 | 25 | 21,4 ± 0,6 | 44,70 ± 0,07 | 34,89 ± 0,05 |
| 18.03.80 | 19 36 07,5 | 44,63 | 34,95 | 25 | 7,0 ± 1,0 | 44,69 ± 0,07 | 34,94 ± 0,05 |
| 18.03.80 | 20 31 29 | 44,7 | 34,9 | 20 | 29,2 ± 0,2 | 44,76 ± 0,09 | 34,86 ± 0,06 |
| 18.03.80 | 22 58 03 | 44,7 | 35,0 | 20 | 03,3 ± 0,7 | 44,70 ± 0,04 | 34,95 + 0,04 |
| Закарпатье | | | | | | | |
| 24.10.65 | 06 26 51 | 48,18 | 22,60 | 5 | 50,1 ± 0,4 | 48,11 ± 0,02 | 22,58 ± 0,04 |
| 25.02.74 | 01 59 04 | 48,40 | 22,98 | 3 | 04,0 ± 0,2 | 48,36 ± 0,10 | 23,02 ± 0,09 |
| 14.05.74 | 08 30 43 | 49,03 | 24,0 | 3,1 | 41,2 ± 1,0 | 49,02 ± 0,05 | 24,05 ± 0,14 |
| 22.09.79 | 08 06 12,3 | 48,16 | 23,62 | 4 | 12,3 | 48,17 | 23,64 |
| 22.09.79* | 06 09 6* | 48,27* | 23,60* | 10* | ± 0,6 12,3 ± 0,7 | ± 0,01 48,24 ± 0,04 | ± 0,02 23,64 ± 0,01 |
| Кавказ | | | | | | | |
| 20.02.75 | 14 44 20,8 ± 2,0 | 42,5 ± 0,1 | 45,3 ± 0,1 | 23 (15-35) | 21,4 ± 1,2 | 42,38 ± 0,12 | 45,27 ± 0,08 |
| 10.09.75 | 06 42 40,6 ± 2 | 43,4 ± 0,2 | 44,8 (0,2) | (10) (5-20) | 41,0 ± 1,0 | 43,35 | 44,75 |
| 04.07.76 | 6 47 13,6 | 42,1 | 46,0 | 25 | 16,9 ± 0,8 | 42,02 ± 0,60 | 46,04 ± 0,05 |
| 10.01.77 | 12 26 16,5 | 41,1 | 43,9 | 0-10 | 17,1 ± 0,8 | 41,08 ± 0,09 | 43,97 ± 0,12 |
| 5.03.77 | 09 02 55 | 41,3 | 45,3 | 0-10 | 60,0 ± 0,7 | 41,36 ± 0,01 | 45,33 ± 0,06 |
| 5.03.77 | 09 04 35,6 | 41,3 | 45,3 | 0-10 | 36,6 ± 1,2 | 41,27 ± 0,07 | 45,41 ± 0,10 |

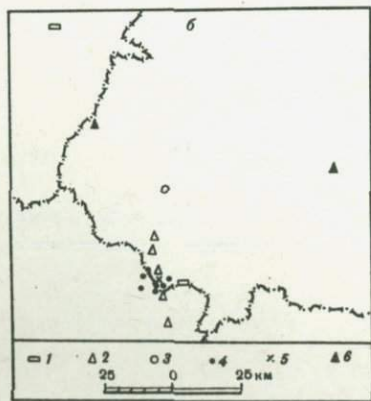
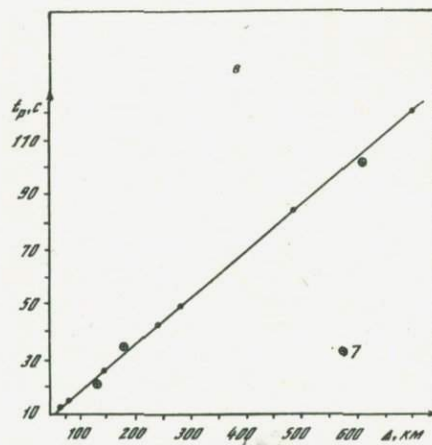
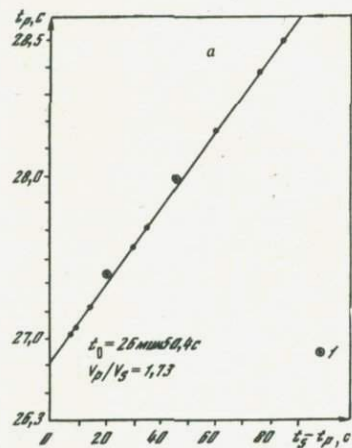
* — Данные ISC и результаты сравнения данных ISC с расчетами на ЭВМ.

| Расчет на ЭВМ | | | | | | | | |
|----------------------|---------------------------|-----|--|--------------|---------------|---------------|---------|----------|
| $h_0 \pm \delta h_0$ | $v \pm \delta v$ | N | Δ_{\min} (Δ_{\max}) | ΔA_z | φ_0^- | λ_0^- | h_0^- | h_0^+ |
| Кры м | | | | | | | | |
| 11 ± 4 | 5,07 ± 0,05 | 5 | 10 (104) | 155 | 0,00 | 0,02 | | 4 |
| 16+ | 7,31 | 12 | 121 (620) | 210 | 0,10 | 0,43 | | 17 |
| 10 22 ± 5 | ± 0,14 5,46 ± ± 0,2 | 5 | 12 (85) | 170 | 0,02* 0,03 | 0,13* 0,02 | | 30* 2 |
| 21 ± 3 | 5,57 ± 0,11 | 5 | 12 (85) | 170 | 0,02 | 0,01 | | 1 |
| 31 ± 4 | 5,98 ± 0,19 | 5 | 38 (96) | 160 | 0,09 | 0,07 | | 6 |
| 26 ± 4 | 6,25 ± 0,19 | 5 | 42 (100) | 160 | 0,06 | 0,01 | | 1 |
| 22 ± 4 | 6,18 ± 0,25 | 5 | 37 (96) | 160 | 0,06 | 0,04 | | 2 |
| 34 ± 4 | 6,10 ± 0,21 | 5 | 43 (100) | 160 | 0,0 | 0,05 | | 14 |
| Закарпатье | | | | | | | | |
| 7 ± 6 | 5,76 ± 0,05 | 11 | 65 (670) | 210 | 0,07 | 0,02 | | 2 |
| 0 ± 0 | 5,24 ± 0,16 | 5 | 40 (177) | 165 | 0,04 | 0,04 | | 3 |
| 37 ± 10 | 5,68 ± 0,16 | 14 | 69 (419) | 240 | 0,01 0,02 | 0,05 0,01 | | 4 |
| 0 ± 0 | 5,84 ± 0,10 | 15 | 39 (745) | 335 | 0,01 0,10* | 0,02 0,04* | | 4 10* |
| 11 ± 10 | 5,67 ± 0,01 | 14 | 30 (735) | 335 | 0,08 0,03* | 0,02 0,04* | | 7 1* |
| Кавказ | | | | | | | | |
| 15 ± 10 | 5,93 ± 0,38 | 8 | 58 (185) | 155 | 0,12 | 0,03 | | 8 |
| 16 | 5,24 | 6 | 77 (245) | 250 | 0,05 | 0,05 | | 6 |
| 18 ± 10 | 6,3 ± 0,1 | 7 | 33 (263) | | 0,08 | 0,04 | | 7 |
| 2 ± 5 | 6,07 ± 0,41 | 10 | 36 (206) | 360 | 0,02 | 0,07 | | |
| 9 ± 4 | 6,45 ± 0,14 | 12 | 88 (230) | 360 | 0,06 | 0,03 | | |
| 0,5 ± 1 | 5,81 ± 0,28 | 11 | 90 | 360 | 0,03 | 0,11 | | |

Таблица 2

Влияние на точность определения расчетных параметров вариации исходных данных
 24.10.65 $t'_0 = 06-26-50,5$; $\varphi'_0 = 48^\circ 18'$; $\lambda'_0 = 22,60$; $h'_0 = 5$ км

| $t_0 \pm \delta t_0$ | $\varphi_0 \pm \delta \varphi_0$ | $\lambda_0 \pm \delta \lambda_0$ | $h_0 \pm \delta h_0$ | $v_p \pm \delta v_p$ |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| 50,2 ± 0,4 | 48,01 ± 0,05 | 22,69 ± 0,01 | 0 ± 0 | 5,84 ± 0,06 |
| 50,1 ± 0,4 | 48,01 ± 0,08 | 22,66 ± 0,04 | 0 ± 0 | 5,88 ± 0,15 |
| 50,1 ± 0,4 | 48,05 ± 0,09 | 22,67 ± 0,04 | 1 ± 2 | 5,78 ± 0,15 |
| 50,1 ± 0,4 | 48,09 ± 0,05 | 22,65 ± 0,03 | 2 ± 6 | 5,74 ± 0,09 |
| 50,1 ± 0,4 | 48,11 ± 0,02 | 22,58 ± 0,04 | 7 ± 5 | 5,76 ± 0,05 |
| 50,1 ± 0,5 | 48,12 ± 0,02 | 22,55 ± 0,01 | 3 ± 3 | 5,75 ± 0,04 |
| 49,6 ± 0,6 | 48,08 ± 0,09 | 22,54 ± 0,10 | 1 ± 3 | 5,82 ± 0,18 |
| 50,5 ± 0,7 | 48,04 ± 0,03 | 22,75 ± 0,05 | 0 ± 0 | 5,58 ± 0,11 |
| 50,4 ± 0,5 | 48,07 ± 0,07 | 22,59 ± 0,09 | 1 ± 3 | 5,98 ± 0,31 |
| 50,8 ± 0,4 | 48,12 ± 0,09 | 22,59 ± 0,08 | 1 ± 5 | 5,94 ± 0,20 |



Р и с. 3. К расчету основных параметров Закарпатского землетрясения 24 октября 1965 г.

а — определение t_0 по графику Вадати: 1 — отбракованные точки; б — положение эпицентров после второго цикла расчетов: 2 — по азимутальному створу; 3 — по h и v ; 4 — по гипоцентральному расстоянию; 5 — оставшиеся после отбраковки; б — среднее "истинное"; в — годограф P волн: 7 — точки, соответствующие станциям, с невязкой времени вступления $\alpha t^2 > 2c$

| N | Δ_{\min} | Δ_{\max} | ΔA_z | $d\varphi$ | $d\lambda$ | dh |
|-----|-----------------|-----------------|--------------|------------|------------|------|
| 7 | 77 | 630 | 205 | 0,17 | 0,01 | 5 |
| 8 | 76 | 670 | 205 | 0,17 | 0,06 | 5 |
| 9 | 72 | 630 | 205 | 0,13 | 0,07 | 4 |
| 10 | 67 | 670 | 205 | 0,09 | 0,05 | 3 |
| 11 | 64 | 670 | 207 | 0,07 | 0,02 | 2 |
| 10 | 83 | 670 | 207 | 0,06 | 0,05 | 2 |
| 9 | 134 | 670 | 205 | 0,10 | 0,06 | 4 |
| 6 | 77 | 470 | 68 | 0,14 | 0,15 | 5 |
| 8 | 68 | 480 | 143 | 0,11 | 0,01 | 4 |
| 8 | 63 | 290 | 195 | 0,06 | 0,01 | 4 |

в) диапазона Δ_{\min} (минимального эпицентрального расстояния до ближайшей станции) и Δ_{\max} (максимального эпицентрального расстояния до удаленной станции); г) азимутального сектора, в котором расположены станции по отношению к очагу ΔA_z .

Были рассчитаны варианты для различного числа вступлений S волн ($N^S = 1, \dots, 11$) с фиксированным числом вступлений P ($N^P \neq 11$). Погрешности времени в очаге при этом оказались не более 1 с, глубины — не более 1 км, широты и долготы — не более 4 км.

Результаты расчета координат гипоцентров при вариации параметров, указанных в пунктах (б–г), представлены в табл. 2. Из таблицы видно, что, как и следовало ожидать, наибольшие отклонения ($d\varphi, d\lambda, dh$) расчетов на ЭВМ от данных сравнения ($\varphi'_0, \lambda'_0, h'_0$) и большой внутренний разброс ($\delta\varphi, \delta\lambda, \delta h$) определяемых параметров получены при уменьшении числа станций (№ 1–3), при использовании станций, расположенных в узком азимутальном секторе (№ 8–9), и при отсутствии ближайшей к очагу станции (№ 7). При этом время в очаге определено практически с одинаковой погрешностью (кроме № 7).

В целом во всех вариантах даже при ухудшении исходных данных отклонения по φ не превысили 0,017, по λ — 0,015, по h — 5 км.

Таким образом, предварительный анализ расчетов показывает, что разработанный алгоритм поиска гипоцентров может быть применен в практике обработки местных землетрясений.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Соотношения между определителями. Разложим Δ^x по строке элементов t_k :

$$\Delta^x = -t_1 [(r_3 - r_2) \times (r_4 - r_2)]_x + t_2 [(r_3 - r_1) \times (r_4 - r_1)]_x - \dots$$

Аналогично Δ^y и Δ^z представляют собой y и z — компоненты тривектора

$$a \equiv -t_1 (r_3 - r_2) \times (r_4 - r_2) + t_2 (r_3 - r_1) \times (r_4 - r_1) - t_3 (r_2 - r_1) \times (r_4 - r_1) + t_4 (r_2 - r_1) \times (r_3 - r_1).$$

Заменим,

$$(r_3 - r_2) \times (r_4 - r_2) = (r_3 - r_1) \times (r_4 - r_1) - (r_3 - r_1) \times (r_2 - r_1) - (r_2 - r_1) \times (r_4 - r_1);$$

$$a = (t_2 - t_1)(r_3 - r_1) \times (r_4 - r_1) - (t_3 - t_1)(r_2 - r_1) \times (r_4 - r_1) + \\ + (t_4 - t_1)(r_2 - r_1) \times (r_3 - r_1).$$

Три вектор $\mathbf{b} = \{ \Delta_x, \Delta_y, \Delta_z \}$ отличается от \mathbf{a} заменой $t_k \rightarrow t_k^2$, три вектор $\mu = \{ \mu_x, \mu_y, \mu_z \}$ — заменой $t_k \rightarrow r_k^2 \equiv |r_k|^2$ (для всех k). Последний, однако, не инвариантен относительно параллельного переноса координатной системы, не инвариантен поэтому и скалярные произведения $\mathbf{a}\mu$ и $\mathbf{b}\mu$. Действительно, при преобразовании радиус-векторов $r_k = r'_k + r_0$, где $r_0 \equiv \vec{OO'}$ — радиус-вектор нового начала, μ получает приращение, равное

$$-2[r_0(r_2 - r_1)] [(r_3 - r_1) \times (r_4 - r_1)] + 2[r_0(r_3 - r_1)] [(r_2 - r_1) \times (r_4 - r_1)] - 2[r_0(r_4 - r_1)] [(r_2 - r_1) \times (r_3 - r_1)] = -2r_0\Delta,$$

три векторы \mathbf{a} и \mathbf{b} не меняются, следовательно, например:

$$\mathbf{a}\mu = (\mathbf{a}\mu') + 2\Delta \left\{ (t_2 - t_1)[r_0(r_3 - r_1)(r_4 - r_1)] - (t_3 - t_1)[r_0(r_2 - r_1)(r_4 - r_1)] + (t_4 - t_1)[r_0(r_2 - r_1)(r_3 - r_1)] \right\}.$$

Δ^1 и Δ_1 есть линейные комбинации смешанных произведений.

Например:

$$\Delta^1 = t_1 [(r_2 - r_1)(r_3 - r_1)(r_4 - r_1)] - (t_2 - t_1)[r_1(r_3 - r_1)(r_4 - r_1)] + \\ + (t_3 - t_1)[r_1(r_2 - r_1)(r_4 - r_1)] - (t_4 - t_1)[r_1(r_2 - r_1)(r_3 - r_1)] = (\Delta^1)' - \\ - (t_2 - t_1)[r_0(r_3 - r_1)(r_4 - r_1)] + (t_3 - t_1)[r_0(r_2 - r_1)(r_4 - r_1)] - \\ - (t_4 - t_1)[r_0(r_2 - r_1)(r_3 - r_1)].$$

Аналогично для Δ_1 . Отсюда следует, что суммы $\mathbf{a}\mu/2\Delta^2 + \Delta^1/\Delta$ и $\mathbf{b}\mu/2\Delta^2 + \Delta_1/\Delta$ в правой части уравнения (6) остаются инвариантными и при параллельном переносе. Рассмотрим теперь векторное произведение

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \left\{ \Delta^y \Delta_z - \Delta^z \Delta_y, \Delta^z \Delta_x - \Delta^x \Delta_z, \Delta^x \Delta_y - \Delta^y \Delta_x \right\}.$$

Применяя тождество

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \times (\mathbf{c} \times \mathbf{f}) = [\mathbf{a}\mathbf{c}\mathbf{f}] \mathbf{b} - [\mathbf{b}\mathbf{c}\mathbf{f}] \mathbf{a} = [\mathbf{a}\mathbf{b}\mathbf{f}] \mathbf{c} - [\mathbf{a}\mathbf{b}\mathbf{c}] \mathbf{f},$$

группируя члены и учитывая, что $[(r_2 - r_1)(r_3 - r_1)(r_4 - r_1)] = \Delta$, найдем

$$\mathbf{b} \times \mathbf{a} = \Delta \left[-r_1 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ t_2^2 & t_3^2 & t_4^2 \\ t_2 & t_3 & t_4 \end{vmatrix} + r_2 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ t_1^2 & t_3^2 & t_4^2 \\ t_1 & t_3 & t_4 \end{vmatrix} - r_3 \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ t_1^2 & t_2^2 & t_4^2 \\ t_1 & t_2 & t_4 \end{vmatrix} + \dots \right].$$

В квадратных скобках стоит вектор с компонентами $\Delta_y^z, \Delta_z^x, \Delta_x^y$. Итак, $\Delta^z \Delta_y - \Delta^y \Delta_z = \Delta \Delta_y^z$, $\Delta^x \Delta_z - \Delta^z \Delta_x = \Delta \Delta_z^x$, $\Delta^y \Delta_x - \Delta^x \Delta_y = \Delta \Delta_x^y$. Преобразуем еще разность $\Delta^1 \mathbf{b} - \Delta_1 \mathbf{a}$. Раскладываем Δ^1 по строке элементов t_k^2 :

$$\Delta^1 = t_1 [r_2 r_3 r_4] - t_2 [r_1 r_3 r_4] + t_3 [r_1 r_2 r_4] - t_4 [r_1 r_2 r_3]; \Delta_1 = t_1^2 [r_2 r_3 r_4] - \dots$$

Перемножаем, используя сначала формулу двойного векторного произведения $\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b}(\mathbf{a}\mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a}\mathbf{b})$, читаемую справа налево. Например, для коэффициента при $t_1 t_2 (t_2 - t_1)$

$$[r_2 r_3 r_4] (r_3 - r_1) \times (r_4 - r_1) - [r_1 r_3 r_4] (r_3 - r_2) \times (r_4 - r_2) = [(r_2 - r_1) r_3 r_4] r_3 \times r_4 + [r_1 r_3 r_4] (r_3 \times r_2 + r_2 \times r_4) - [r_2 r_3 r_4] (r_3 \times r_1 + r_1 \times r_4) = \\ = [(r_2 - r_1) r_3 r_4] r_3 \times r_4 + r_4 \times [(r_2 \times r_3) \times (r_3 \times r_1)] - r_3 \times [(r_2 r_4) \times (r_1 \times r_4)] = [(r_2 - r_1)(r_3 - r_1)(r_4 - r_1)] r_3 \times r_4 = \Delta r_3 \times r_4.$$

Поступая так же со всеми коэффициентами при $t_k t_l (t_k - t_l) (k, l = 1, 2, 3, 4, k < l)$, убеждаемся, что

$$(\Delta^1 \mathbf{b} - \Delta^1 \mathbf{a}) / \Delta = t_1 t_2 (t_2 - t_1) r_3 \times r_4 + t_1 t_3 (t_1 - t_3) r_2 \times r_4 + t_1 t_4 (t_4 - t_1) r_2 \times r_3 + t_2 t_3 (t_3 - t_2) r_1 \times r_4 + t_2 t_4 (t_4 - t_2) r_3 \times r_1 + \dots$$

Справа в этом равенстве стоит вектор с компонентами $\Delta_x^1, \Delta_y^1, \Delta_z^1$. Таким образом, доказано, что

$$\Delta^1 \Delta_x - \Delta^x \Delta_1 = \Delta \Delta_x^1, \Delta^1 \Delta_y - \Delta^y \Delta_1 = \Delta \Delta_y^1, \Delta^1 \Delta_z - \Delta^z \Delta_1 = \Delta \Delta_z^1.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев С.С. О методах интерпретации близких землетрясений. — В кн.: Физика землетрясений и сейсмика взрывов. М.: Изд-во АН СССР, 1962, с. 226—311.
2. Землетрясения в СССР. / Под ред. Е.Ф. Саваренского и др. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 412 с.
3. Тресков А.А., Вертлиб М.Б. Объективное определение эпицентров близких землетрясений. М.: Наука, 1973. 74 с.
4. Румшиский Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. Л.: Наука, 1971. 192 с.
5. Зайдель А.Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука, 1974. 107 с.
6. Евсеев С.В. К вопросу об определении элементов близких землетрясений. — В кн.: Сборник статей и докладов. М.: Изд-во АН СССР, 1954, с. 95—101. (Тр. Геофиз. ин-та; № 22 (149)).
7. Кульчицкий В.Е., Пустовитенко Б.Г., Дубинский И.Б. К методике обработки Крымско-Черноморских землетрясений. — В кн.: Сейсмологический бюллетень Западной территории зоны ЕССН (Крым—Карпаты за 1975—1976 гг.). Киев: Наук. думка, 1982, с. 126—146.
8. Костюк О.П., Руденская И.И. Сейсмичность Карпат в 1965 году. — В кн.: Сейсмичность Украины. Киев: Наук. думка, 1969, с. 23—32.
9. Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым—Карпаты за 1970—1974 гг.). Киев: Наук. думка, 1980. 190 с.
10. Пронишин Р.С., Пустовитенко Б.Г. Особенности процессов в эпицентральной зоне закарпатских землетрясений в 1979 г. — Геофиз. журн. АН УССР, 1981, № 6, с. 70—86.
11. Сейсмологический бюллетень Кавказа 1975, 1976, 1977 г. Тбилиси: Мецниереба, 1977. 192 с.; 1979; 1980. 160 с.
12. Пустовитенко Б.Г. Очаг Черноморского землетрясения 17 апреля 1975 года. — В кн.: Сейсмологический бюллетень Западной территориальной зоны ЕССН СССР (Крым—Карпаты за 1975—1976 гг.). Киев: Наук. думка, 1982, с. 70—85.

УДК 550.341.3

СПОСОБ БЫСТРОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЭПИЦЕНТРА ПРИ МИНИМУМЕ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.А. Поплавский, А.Г. Тоток

Многим оперативным сейсмологическим службам (службе срочных донесений, предупреждения об угрозе цунами) не требуется высокая точность в оценке положения эпицентра. В то же время решение задачи об эпицентре этими службами, как правило, осуществляется в условиях острого дефицита времени при минимальном объеме исходной информации о землетрясении.

В настоящей работе описывается быстродействующий алгоритм, использующий в качестве исходных данных порядок поступления однотипной информации о землетрясении на отдельные сейсмические станции, а в качестве исходного предположения о строении среды — предположение

о том, что вещество Земли является изотропным и механические его свойства зависят только от радиальной координаты (с началом в центре Земли). Это предположение, строго говоря, не выполняется, что в ряде случаев будет ограничивать практическое применение предлагаемого метода. Первые упоминания о нем появились в 1980 г. [1] в докладах на Всесоюзном совещании по проблеме цунами во Владивостоке и в работе [2]. Краткое описание метода опубликовано в [3].

Пусть имеется n станций, зарегистрировавших P -волну землетрясения, и, следовательно, известен порядок, в котором она вступала в каждую точку регистрации. В рамках вышеприведенного исходного предположения этот порядок будет точно совпадать с порядком возрастания соответствующих эпицентральных расстояний. Требуется определить область на поверхности Земли, расстояния от каждой точки которой до данной группы станций возрастают в том же порядке.

Очевидно, что общим решением задачи будет разбиение поверхности Земли (сферы) на области большими кругами (средними линиями), проведенными через середины дуг, соединяющих пару станций, перпендикулярно к ним. Каждая такая область будет соответствовать определенному порядку возрастания эпицентральных расстояний, и требуется отыскать среди них ту, которая соответствует заданному порядку. Прежде чем решать эту задачу, выясним некоторые свойства общего решения.

Число N областей разбиения сферы средними линиями зависит от числа n станций и их взаимного расположения. Оценим минимальное и максимальное значения $N(n)$, соответствующие наименее "благоприятным" вариантам расположения n станций. Легко убедиться в том, что наименьшее число областей разбиения сферы средними линиями получится, когда $n > 3$ станций, расположенных в вершинах правильного многоугольника. В этом случае средние линии будут проходить через каждую вершину, через середину каждой стороны многоугольника, а также иметь, подобно меридианам, две антиподные точки пересечения и разделять сферу на $N_{\min}(n) = 2n$ областей. Для оценки $N_{\max}(n)$ решим сначала вспомогательную задачу о максимальном числе N^* разбиений сферы произвольно проведенными большими кругами. Очевидно, N^* будет максимально, если никакие три больших круга не пересекаются в одной точке.

Число $N_{\max}^*(M)$ оценим из следующих соображений. Один круг разбивает сферу на две области. Легко видеть, что каждый последующий (m -й) круг пересекает все предыдущие в $2(m-1)$ точках, увеличивая число областей разбиения также на $2(m-1)$. Поэтому, для M кругов

$$N_{\max}^*(M) = 2 + 2 \sum_{m=1}^M (m-1),$$

или

$$N_{\max}^*(M) = M(M-1) + 2.$$

Возвращаясь к исходной задаче, нетрудно видеть, что число M средних линий для всевозможных парных сочетаний из n точек равно

$$M = C_n^2 = n(n-1)/2. \quad (1)$$

Однако (три) средние линии, построенные для любой тройки точек, всегда пересекаются в одной точке. Поэтому максимальное число $N_{\max}(n)$ областей разбиения сферы средними линиями системы n точек будет на $2C_n^3$ меньше (1). Следовательно, с учетом (1)

$$N_{\max}(n) = \frac{n(n-1)}{2} \left[\frac{n(n-1)}{2} - 1 \right] - \left[\frac{n(n-1)(n-2)}{3} - 2 \right]. \quad (2)$$

Данная оценка, очевидно, отвечает требованию, чтобы никакие 4 средние линии не пересекались в одной точке.

Величина (2) растет пропорционально n^4 . Поэтому с ростом n должна быстро убывать средняя площадь S отдельной области разбиения. Отсюда следует, что положение эпицентра на трансверсально однородной и изотропной Земле может быть определено в среднем со сколь угодно малой погрешностью без использования скоростного разреза, если правильно распределить по поверхности земного шара необходимое число станций. Реально точность определения эпицентра будет зависеть от правильности упорядочения этих станций по временам вступления сейсмических волн и соответствия этого упорядочения действительному порядку возрастания соответствующих эпицентральных расстояний.

Расчеты показывают, что при соответствующей расстановке станций средняя погрешность оценки положения эпицентра (\sqrt{S}) становится приемлемой, когда их число в целом для земного шара $n = 70 \div 120$. Оно завсегда много меньше фактического числа сейсмических станций, существующих в мире.

Теперь решим задачу отыскания области, соответствующей данному порядку возрастания эпицентральных расстояний группы произвольно расположенных станций.

На сфере S произвольного радиуса $r \neq 0$ в R^3 с центром в начале координат задана совокупность точек P_i ($i = 1, 2, \dots, M$). Каждая точка однозначно определена своими угловыми координатами φ и λ (φ — угол между \vec{OP} и OZ , λ — угол между проекцией \vec{OP} на плоскость XOY и осью OX). Для заданной последовательности натуральных чисел l_j ($1 \leq l_j \leq n$, $l_j \neq l_k$ при $j \neq k$, $j = 1, 2, \dots, M$) требуется построить геометрическое место точек Q , таких, что

$$\rho(Q : P_{I_1}) < \rho(Q : P_{I_2}) < \dots < \rho(Q : P_{I_N})$$

и $Q \in S$.

Пусть $\mathbf{a} = \{a_1, a_2, a_3\}$ вектор единичной длины ($|\mathbf{a}| = 1$). Вектор \mathbf{a} однозначно определяет в R^3 плоскость (к которой он ортогонален), проходящую через начало координат, соотношением

$$(\mathbf{OP} \times \mathbf{a}) = 0, \quad P \in \gamma,$$

и окружность большого круга $l \subset S$, $l = \gamma \cap S$, соотношением

$$(\mathbf{OP} \times \mathbf{a}) = 0, \quad P \in S. \quad (3)$$

Записывая (3) в евклидовых координатах точки $P(x, y, z)$, выраженных через угловые координаты, и сокращая на $r \neq 0$, получаем

$$L(P) = (\mathbf{OP} \times \mathbf{a}) / r = (a_1 X + a_2 Y + a_3 Z) / r = \\ = a_1 \cos \varphi \cos \lambda + a_2 \cos \varphi \sin \lambda + a_3 \sin \varphi = 0. \quad (4)$$

Совокупность точек $\{Q : Q \in S, L(Q) > 0\}$ представляет собой пересечение полупространства $\{P : L(P) > 0\}$ со сферой S и является полусферой S^+ , ограниченной окружностью большого круга l . То же самое верно для $\{Q' : Q' \in S, L(Q') > 0\}$. Таким образом, окружность l разбивает сферу на две полусферы S^+ и S^- . Известно, что для двух заданных несовпадающих точек P_1 и P_2 множество $u = \{Q : \rho(Q : P_1) < \rho(Q : P_2)\}$ представляет собой полупространство, лежащее

по одну сторону плоскости γ_{12} , проходящей через середину и ортогональной отрезку P_1P_2 . Для сферы $V = U \cap S = \{Q: \rho(Q: P_1) < \rho(Q: P_2), Q \in S\}$ есть полусфера, ограниченная окружностью большого круга l_{12} , проведенной через середину и ортогональной дуге большого круга μ_{12} , соединяющей точки P_1 и P_2 . Рассмотрим

$$a_{12} = \frac{(OP_1 - OP_2)}{|(OP_1 - OP_2)|}. \quad (5)$$

Очевидно, $|a_{12}| = 1$; окружность, определяемая a_{12} посредством (4), проходит через середину дуги μ_{12} (M_{12}), так как $OM_{12} = (OP_1 + OP_2) \times r / |(OP_1 + OP_2)|$ (если $OP_1 + OP_2 \neq 0$) и $(OM_{12} \times n_{12}) = r |(OP_1 + OP_2) \times (OP_1 - OP_2)| / |(OP_1 + OP_2)| |(OP_1 - OP_2)|$, т.е. $M_{12} \in l_{12}$; n_{12} компланарен плоскости OP_1P_2 и, следовательно, плоскость $OP_1P_2 \perp \gamma_{12}$ и $l_{12} \perp \mu_{12}$, так как $\mu_{12} \in OP_1P_2$ и $l_{12} \perp \gamma$. В случае, если $OP_1 + OP_2 \neq 0$ или $OP_1 = -OP_2$, $n_{12} = OP_1$. Тогда, очевидно, любая дуга P_1P_2 пересекается плоскостью γ_{12} (или окружностью l_{12}) в середине и γ_{12} (или окружность l_{12}) ортогональна любой дуге P_1P_2 .

Таким образом, вектор a_{12} определяет окружность l_{12} , которая разбивает S на две полусферы S_{12}^+ и S_{12}^- , для одной из которых $(Q: P_1) < \rho(Q: P_2)$. Заметим, что $\rho(P_1: P_2) > 0$, а $\rho(P_1: P_1) = 0$, следовательно, $\rho(P_1: P_1) < \rho(P_1: P_2)$, т.е. точка P_1 должна принадлежать искомой полусфере. Так как $|OP_1| = |OP_2| = r$ и $OP_1 \neq OP_2$ и, принимая во внимание соотношения (4) и (5), получаем

$$L_{12}(P_1) = (1 - \cos \varphi_{12}) r / |OP_1 - OP_2|,$$

где φ_{12} — угол между векторами OP_1 и OP_2 . Но $\cos \varphi_{12} < 1$ и, следовательно, $L(P_1) > 0$, т.е. искомая полусфера есть S_{12}^+ .

В случае $N > 2$ искомая область

$$\Omega_N = \left\{ Q: Q \in S; \rho(Q: P_{I_1}) < \rho(Q: P_{I_2}) < \dots < \rho(Q: P_{I_N}) \right\} = \bigcap_{i < j} \left\{ Q: Q \in S; \rho(Q: P_{I_i}) < \rho(Q: P_{I_j}) \right\} = \bigcap_{i < j} \omega_{ij}.$$

Легко видеть, что $\Omega_N = \bigcap_{i=1}^{N-1} \omega_{i,i+1}$. Пусть $\Omega'_N \neq \bigcap_{k=1}^{N-1} \omega_{k,k+1} \neq \Omega_N$, тогда, по

определению, $\Omega'_N \supset \Omega_N$, т.е. существует точка Q , такая, что $Q \in \Omega'_N$ и $Q \notin \Omega_N$, или существует множество ω_{ij} , такое, что $Q \notin \omega_{ij}$. Отсюда следует, что существуют такие i и j ($i < j$), что $\rho(Q: P_{I_i}) \geq \rho(Q: P_{I_j})$, (6)

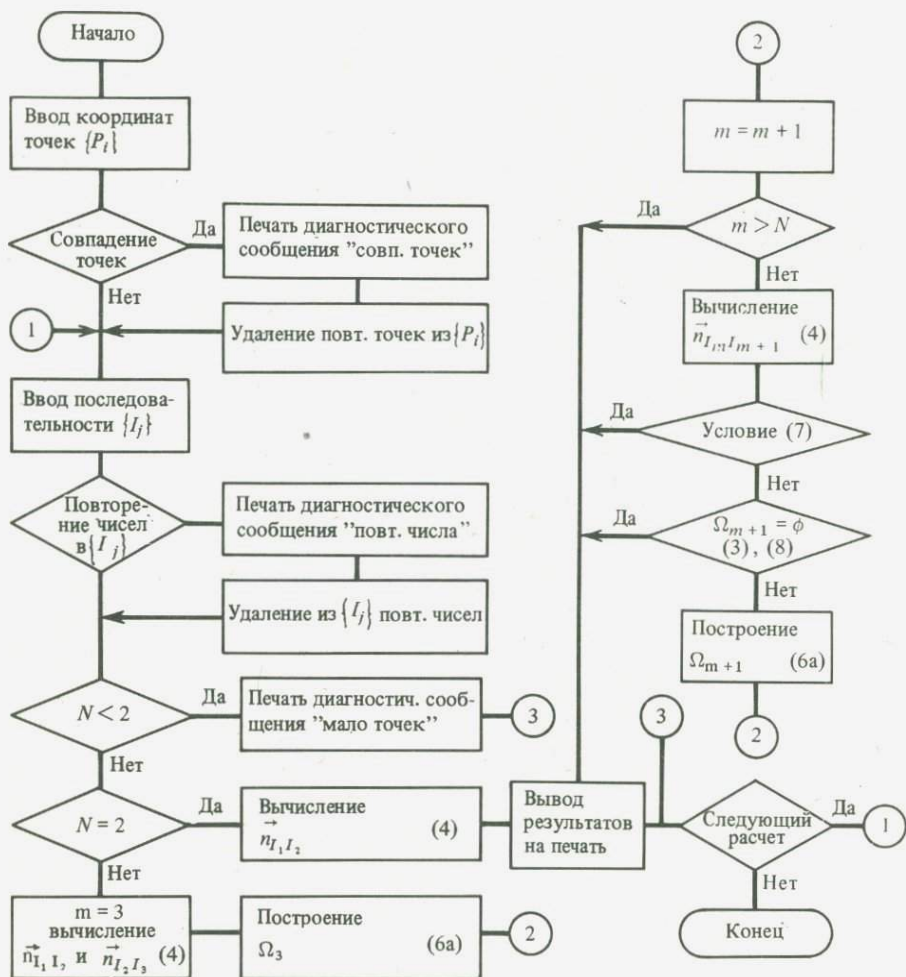
но $Q \in \Omega'_N$, т.е. $Q \in \bigcap_{k=1}^{N-1} \omega_{k,k+1}$, и подавно $Q \in \bigcap_{k=i}^{j-1} \omega_{k,k+1}$, так как $\bigcap_{k=i}^{j-1} \omega_{k,k+1} \supset \Omega'_N$.

Таким образом, $\rho(Q: P_{I_i}) < \rho(Q: P_{I_{i+1}}) < \dots < \rho(Q: P_{I_j})$, т.е. $\rho(Q: P_{I_i}) < \rho(Q: P_{I_j})$, что противоречит (6). Следовательно, $\Omega'_N = \Omega_N$ и $\Omega_N =$

$\bigcap_{k=1}^{N-1} \omega_{k,k+1}$. Принимая во внимание, что $\omega_{k,k+1} = S_{I_k, I_{k+1}}^+$, имеем

$$\Omega_N = \bigcap_{k=1}^{N-1} S_{I_k, I_{k+1}}^+.$$

Поскольку $S_{I_k, I_{k+1}}^+$ — полусферы, ограниченные окружностями большого круга, область Ω_N является или пустым множеством, или выпуклым многоугольником на сфере, сторонами которого являются дуги, принадлежащие окружностям большого круга. Пусть построена область Ω_m ($m < 26$



Блок-схема алгоритма

$< N$), тогда $\Omega_{m+1} = \Omega_m \cap S_{I_m, I_{m+1}}^+$ Ω_{m+1} есть пересечение многоугольника с полусферой. Можно предложить следующий способ построения Ω_{m+1} (для $m > 2$).

Пусть B_k ($k = 1, 2, \dots, h+1$; $h \leq m$) ($B_{h+1} = B B_1$) — вершины Ω_m, I_k — дуга, соединяющая B_k и B_{k+1} . Если для всех $L_{I_m, I_{m+1}}(B_k) > 0$, то $\Omega_{m+1} = \Omega_m$. Если для всех $1 \leq k \leq h$ и $L_{I_m, I_{m+1}}(B_k) \leq 0$, то Ω_{m+1} — пустое множество и вычисления прекращаются. В противном случае можно так перенумеровать B_k , что $L_{I_m, I_{m+1}}(B_k) > 0$ для $1 \leq k \leq K' < h$ и $L_{I_m, I_{m+1}}(B_k) \leq 0$ для $K' < k \leq h$. Это следует из того, что многоугольник выпуклый и окружность не может пересекать его границу более двух раз. Далее отбрасываются все B_k ($K' < k \leq h$) и вычисляются координаты двух новых вершин $B_{k'}$ и $B_{k'+1}$ как координаты точек пересечения $l_{I_m, I_{m+1}} \cap l_{k'}$ и $l_{I_m, I_{m+1}} \cap l_{k'+1}$. В качестве дуги, соединяющей $B_{k'}$ и $B_{k'+1}$, рассматривается $l_{k'} = l_{I_m, I_{m+1}}$.

На основании вышеизложенного предложен алгоритм построения Ω_m , блок-схема которого представлена на рисунке. Этот алгоритм реализован на ЭВМ ЕС 1022. По известным координатам станций и заданному порядку возрастания эпицентральных расстояний до них (или какой-то части из них) вычисляются координаты вершин сферического многоугольника, ограничивающего искомую область, ее площадь S и максимальный линейный размер D . На печать выдаются также номера станций в порядке возрастания эпицентральных расстояний и указываются те их пары, средние линии для которых ограничивают область.

С помощью этой программы выполнен численный эксперимент для 38 фиктивных эпицентров (в счете участвовали все 39 сейсмических станций Дальнего Востока), а также расчет эпицентров 91 реального землетрясения Камчатки, Курильских островов и Охотского моря.

Анализ полученных результатов показал, что при использовании данных всех станций Дальнего Востока алгоритм позволяет оценить координаты эпицентров с приемлемой точностью. Расстояния Δr между заданными и найденными эпицентрами не превышали 45 км. При этом в 50% случаев $\Delta r < 7,5$, а в 90% $\Delta r < 30$ км. Наибольшие погрешности в определении координат эпицентров получаются для юго-восточных областей Курильской эпицентральной зоны, если при этом отсутствовали данные наблюдений сейсмических станций Японии.

Время счета по данным численного и натурального эксперимента, включая загрузку программы в память ЭВМ и другие вспомогательные операции, составило 10 мин 18 с, т.е. в среднем менее 4,8 с на один эпицентр.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Soloviev S.L.* All-Union Conference on tsunamis in Vladivostok, USSR. — Tsunami NEWS-letter, 1980, vol. 13, p. 18—22.
2. *Anderson K.R.* Epicentral location using arrival time order. — Bull. Seismol. Soc. Amer., 1981, vol. 71, N 2, p. 541—545.
3. *Поплавский А.А., Тоток А.Г.* Метод геометрических средних линий для определения положения эпицентра землетрясения. — Докл. АН СССР, 1981, № 5, с. 1095—1098.

УДК 550.341.3

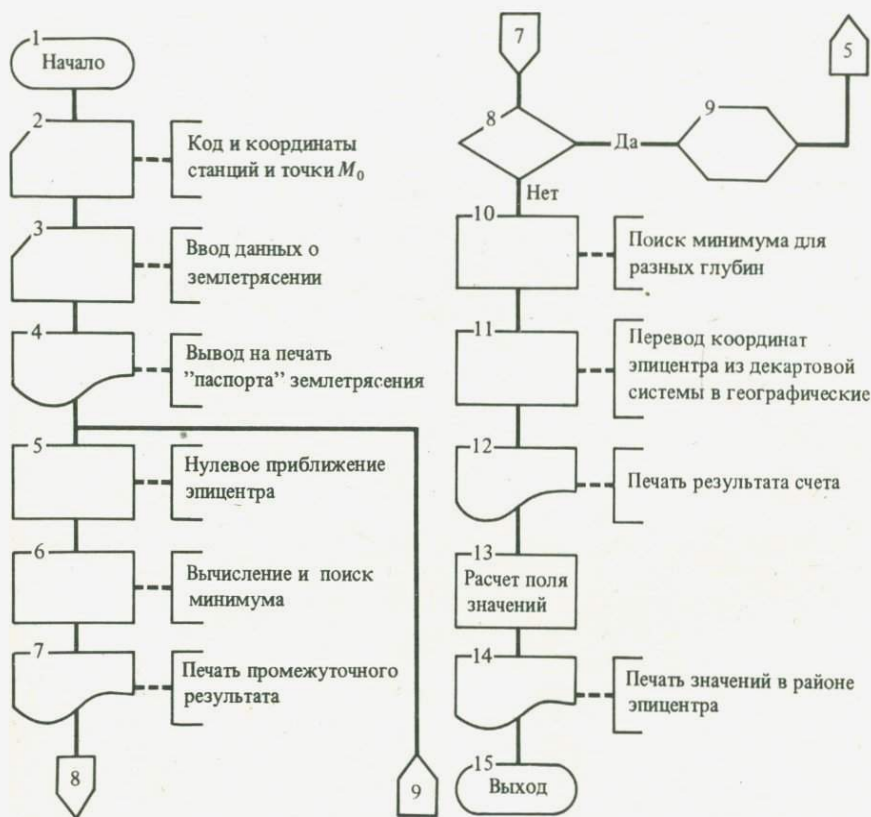
ПРОГРАММА И НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НА ЭВМ ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИМОРЬЯ И ПРИАМУРЬЯ

Т.А. Андреев, С.В. Мишин, Т.В. Нагорных, Л.Н. Поплавская

В основу алгоритма программы, блок-схема которой в изображениях ГОСТ 19.002-80 и ГОСТ 19.003-80 представлена на рис. 1, положен принцип постоянства скорости распространения прямых P - и S - волн от эпицентра до регистрирующих станций.

Если t_i — моменты вступления прямых волн на отдельные сейсмические станции, t_0 — момент возникновения землетрясения, R_i — гипоцентральные расстояния, V — скорость, то

$$t_i = t_0 + R_i / V \quad (1)$$



Р и с. 1. Блок-схема программы

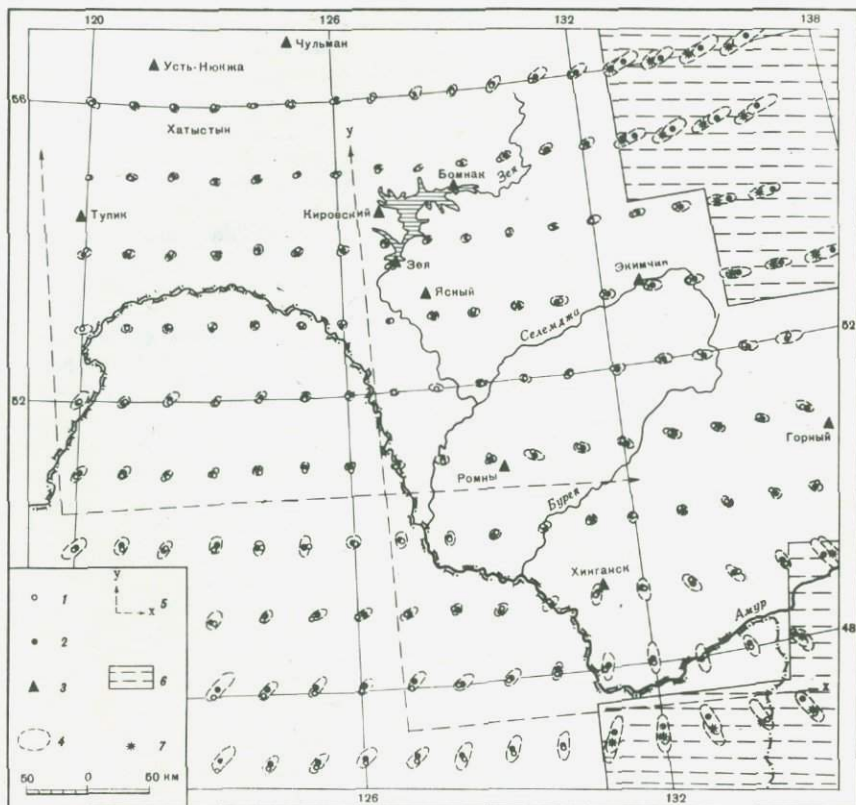
— линейная регрессия, связывающая t_i и R_i , а

$$\sigma_t^2 = \frac{\sum (t_i - t_0 - R_i/V)^2}{N - 1} \quad (2)$$

— несмещенная оценка среднеквадратического отклонения t_i от этой регрессии, N — число станций, зарегистрировавших однотипную прямую волну.

Решение задачи о гипоцентре, таким образом, сводится к поиску точки, относительно которой значение (2) будет минимальным.

Поиск минимума σ_t осуществляется в прямоугольной системе координат в два этапа. На первом этапе глубина гипоцентра принимается равной нулю, а в качестве нулевого приближения эпицентра — координаты ближайшей станции. Затем вычисляются 25 значений σ_t для равноотстоящих от нулевого приближения точек в пределах квадрата со стороной в 400 км. Точка с минимальным значением σ_t принимается за следующее приближение эпицентра. Далее процедура повторяется, причем размеры квадрата, внутри которого осуществляется поиск, каждый раз уменьшаются до 0,75 предыдущего. При достижении удовлетворительного значения σ_t осуществляется переход ко второму этапу минимизации — перебору глубин залегания гипоцентра. Заметим сразу, что по результатам испытаний на землетрясениях Северо-Востока СССР [1], а также Приморья и Приамурья,



Р и с. 2. Результаты численного эксперимента

1 — фиктивные эпицентры; 2 — результаты определения фиктивных эпицентров на ЭВМ; 3 — сейсмические станции; 4 — доверительные области решений; 5 — оси двух выбранных перекрывающихся планшетов; 6 — районы, для которых сказываются ошибки за сферичность; 7 — эпицентры, в расчетах которых ошибка за сферичность учтена

второй этап минимизации приводит к успеху лишь в том случае, когда в выборке имеется хотя бы одна станция с $R_i \leq 50 \div 70$ км. Последнее подтверждается, в частности, результатами работ [2,3].

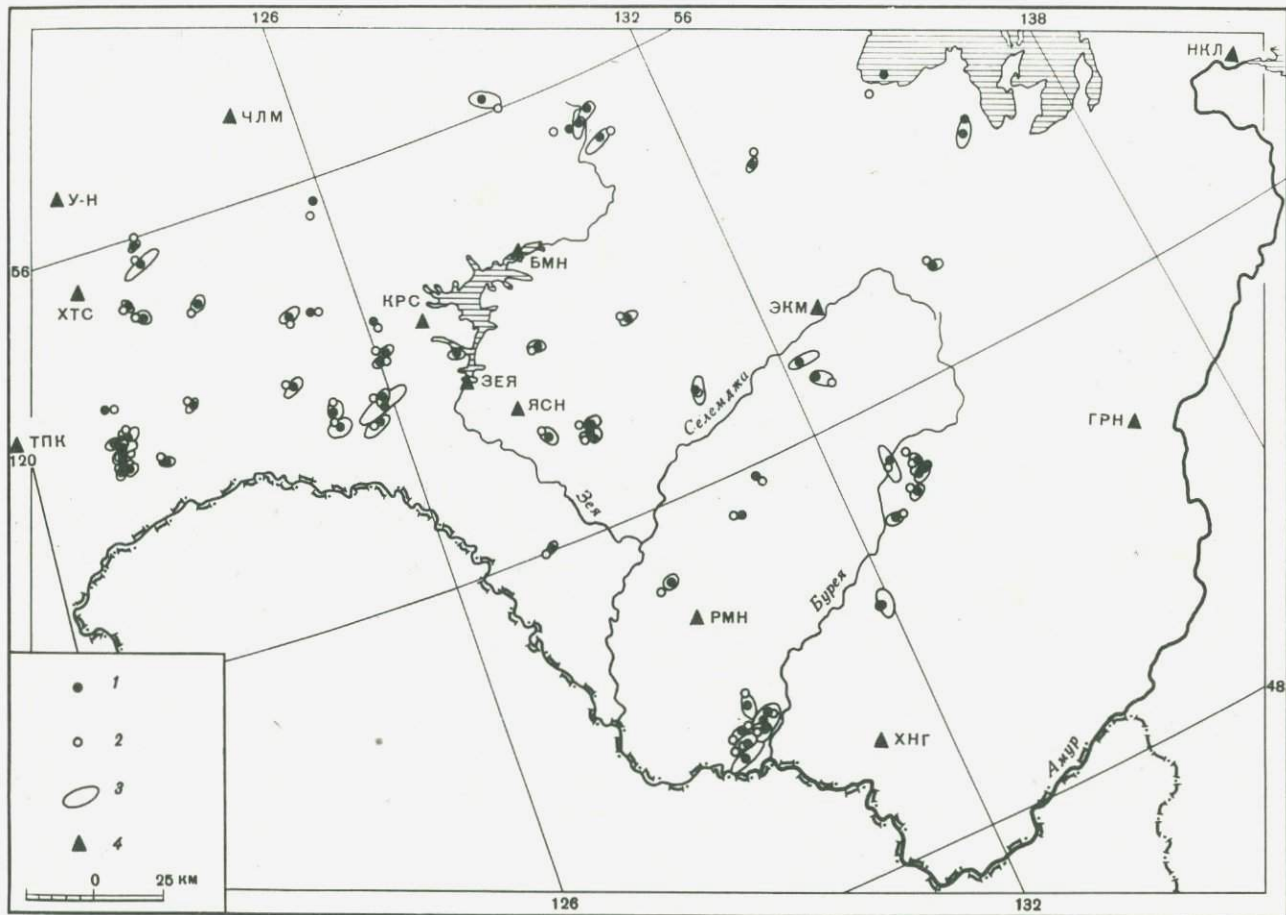
Достижением минимума σ_t кроме координат гипоцентра (эпицентра) определяются t_0 и V .

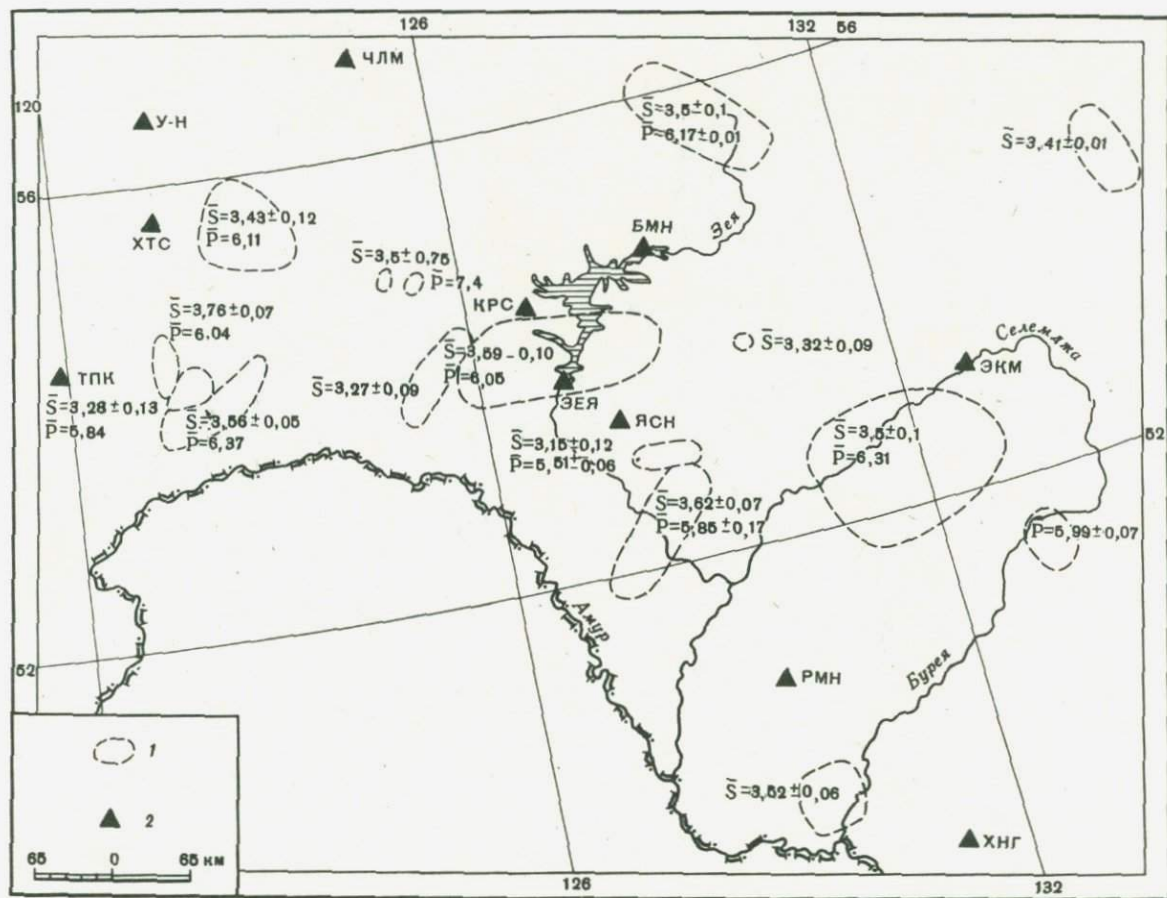
Решение задачи, как мы уже упоминали, осуществляется в декартовых координатах, что наряду с основным принципом реализуемого алгоритма определяет условия применимости программы. Основные из них следующие.

1. Счету по программе должны предшествовать процедуры идентификации волн P или S , то надежности которых в значительной степени зависит точность получаемых решений.

Р и с. 3. Результаты определения на ЭВМ эпицентров реальных землетрясений

1 — решение ЭВМ; 2 — данные ручной обработки; 3 — 85%-ные доверительные области существования эпицентров; 4 — сейсмические станции





Р и с. 4. Экспериментальные данные о распределении кажущихся $v_{\bar{P}}$, $v_{\bar{S}}$ скоростей
 1 — эпицентральные области, для которых получены значения $v_{\bar{P}}$ и $v_{\bar{S}}$; 2 — сейсмические станции

2. Изучаемый эпицентральный район не должен превышать размеров 800 x 800 км и должен включать в себя не менее 4 сейсмических станций.

Кроме того, ограничения на используемый (как и на любой другой) метод накладываются со стороны сети сейсмических станций, возможности которой определяются ее расположением относительно основных эпицентральных областей.

Регион Приморья и Приамурья довольно велик и поэтому был разделен нами на два перекрывающихся (рис. 2) участка, с тем чтобы в каждом из них находилось по 8 сейсмических станций (табл. 1), а размеры не превышали требуемых.

Целесообразность использования упомянутой программы изучалась с помощью численного эксперимента, содержанием которого являлось получение оценок ожидаемых значений σ_t и размеров 85% доверительных областей существования эпицентров.

Результаты численного эксперимента (рис. 2) показали.

1. По данным существующей сети сейсмических станций с помощью программы координаты эпицентров рассчитываются с удовлетворительной точностью практически для всей территории Приморья и Приамурья, исключая северо-восток и юго-восток региона.

2. Точность получаемых решений нельзя достаточно полно охарактеризовать только значениями σ_t без значения размеров доверительной области и положения найденного эпицентра внутри нее.

Опытная эксплуатация программы проводилась по данным наблюдений над 56 реальными землетрясениями Приморья и Приамурья за январь — март 1980 г. (табл. 2). Как видим (рис. 3), расчетные эпицентры в подавляющем большинстве случаев в пределах точности полученных решений совпадают с данными ручной обработки. Как и ожидалось, наибольшие расхождения между ними наблюдались на периферии изучаемого региона, далеко за пределами расположения сейсмических станций.

Как уже упоминалось, кроме решения задачи об эпицентре, программа позволяет оценить среднюю для каждого землетрясения кажущуюся скорость распространения волн \bar{P} и (или) \bar{S} . Представленная в табл. 2 статистика значений $V_{\bar{P}}$ и $V_{\bar{S}}$ невелика, однако она позволила определить сред-

Таблица 1

Станции, осуществляющие наблюдения над землетрясениями Приморья и Приамурья

| Станция | Код | Станция | Код |
|--------------|-----|------------|-----|
| Кировский | КРС | Бомнак | БМН |
| Ясный | ЯСН | Зея | ЗЕЯ |
| Ромны | РМН | Хинганск | ХНГ |
| Экимчан | ЭКМ | Горный | ГРН |
| Тулик* | ТПК | Чульман** | ЧЛМ |
| Усть-Нюкжа** | У-Н | Хатыстын** | ХТС |

* Станция Института земной коры СО АН СССР.

** Станция Института геологии Якутского филиала СО АН СССР.

Таблица 2

Результаты определения на ЭВМ эпицентров землетрясений Приморья и Приамурья и величин кажущихся скоростей (январь—март 1980 г.)

| Дата | Время в очаге ч мин с | Координаты эпицентра | | | | Скорости, км/с | |
|-------|--------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|---------|
| | | Ручная обработка | | Данные ЭВМ | | | |
| | | $\varphi^{\circ}N$ | $\lambda^{\circ}E$ | $\varphi^{\circ}N$ | $\lambda^{\circ}E$ | V_P^- | V_S^- |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 06.01 | 07 54 44 | 53,1 | 128,1 | 53,0 | 128,2 | 5,55 | — |
| 12.01 | 07 32 44 | 54,4 | 122,8 | 54,4 | 122,8 | — | 3,50 |
| 17.01 | 09 55 25 | 54,2 | 126,1 | 54,2 | 125,9 | — | 3,37 |
| 18.01 | 09 09 57 | 54,2 | 121,6 | 54,2 | 121,4 | — | 3,75 |
| 18.01 | 17 18 25 | 54,0 | 121,6 | 54,3 | 122,0 | — | 3,10 |
| 19.01 | 05 34 48 | 54,1 | 121,5 | 54,4 | 121,6 | 6,04 | — |
| 21.01 | 07 29 45 | 53,0 | 128,7 | 52,8 | 128,7 | 5,47 | 3,15 |
| 21.01 | 12 14 42 | 52,8 | 130,6 | 52,8 | 130,5 | 6,31 | 3,58 |
| 24.01 | 03 12 08 | 54,2 | 121,5 | 54,1 | 121,6 | — | 3,36 |
| 24.01 | 06 20 01 | 54,3 | 121,6 | 54,1 | 121,5 | 5,84 | 3,64 |
| 25.01 | 08 13 35 | 50,1 | 129,5 | 49,9 | 129,5 | — | 3,42 |
| 25.01 | 14 59 06 | 51,0 | 135,0 | 51,2 | 134,9 | — | 3,29 |
| 28.01 | 05 09 30 | 49,7 | 129,5 | 49,8 | 129,7 | — | 3,47 |
| 30.01 | 01 04 18 | 53,9 | 125,7 | 53,9 | 125,7 | — | 3,74 |
| 30.01 | 06 34 34 | 52,9 | 128,7 | 52,8 | 128,6 | — | 3,69 |
| 30.01 | 13 56 30 | 56,0 | 129,4 | 56,2 | 129,2 | — | 3,37 |
| 31.01 | 01 04 18 | 53,8 | 125,8 | 53,8 | 126,0 | — | 3,57 |
| 31.01 | 07 44 06 | 50,0 | 129,6 | 49,9 | 129,8 | — | 3,60 |
| 03.02 | 17 36 40 | 54,3 | 126,0 | 54,3 | 126,2 | — | 3,60 |
| 03.02 | 19 50 56 | 55,9 | 122,5 | 55,8 | 122,6 | — | 3,28 |
| 05.02 | 13 14 05 | 56,0 | 122,7 | 55,9 | 122,6 | 6,10 | 3,46 |
| 06.02 | 04 42 24 | 52,0 | 127,5 | 51,9 | 127,4 | — | 3,58 |
| 06.02 | 07 50 58 | 49,8 | 129,3 | 49,6 | 129,5 | — | 3,56 |
| 07.02 | 17 13 04 | 52,7 | 132,3 | 52,8 | 132,2 | 5,80 | 3,40 |
| 07.02 | 23 40 22 | 54,0 | 121,4 | 53,9 | 121,4 | — | 3,57 |
| 08.02 | 05 50 39 | 52,9 | 128,7 | 52,8 | 128,7 | 5,73 | 3,54 |
| 09.02 | 12 10 24 | 54,2 | 121,4 | 54,3 | 121,6 | — | 3,33 |
| 10.02 | 15 34 05 | 54,1 | 121,5 | 54,0 | 121,5 | — | 3,58 |
| 14.02 | 09 00 26 | 55,6 | 130,1 | 55,6 | 129,9 | — | 3,57 |
| 14.02 | 11 18 08 | 53,8 | 128,4 | 53,9 | 128,6 | 6,23 | 3,53 |
| 19.02 | 06 35 27 | 49,8 | 129,4 | 49,7 | 129,7 | — | 3,53 |
| 20.02 | 08 19 08 | 49,7 | 129,1 | 49,8 | 129,3 | — | 3,54 |
| 21.02 | 00 27 29 | 54,6 | 135,2 | 54,7 | 135,5 | — | 3,42 |
| 22.02 | 06 34 33 | 52,9 | 128,7 | 52,8 | 128,6 | — | 3,59 |
| 24.02 | 18 33 04 | 54,0 | 121,5 | 53,9 | 121,5 | — | 3,48 |
| 24.02 | 20 15 04 | 54,8 | 124,8 | 54,8 | 124,9 | — | 3,50 |
| 24.02 | 21 05 04 | 54,0 | 121,5 | 53,9 | 121,4 | — | 3,54 |
| 25.02 | 23 50 04 | 54,8 | 125,3 | 54,8 | 125,2 | 7,40 | — |
| 28.02 | 09 44 06 | 53,8 | 129,9 | 53,8 | 129,8 | — | 3,20 |
| 28.02 | 21 10 07 | 55,4 | 131,0 | 55,4 | 130,7 | — | 3,59 |
| 01.03 | 08 27 14 | 54,5 | 121,6 | 54,6 | 121,4 | — | 3,82 |
| 01.03 | 17 24 35 | 55,6 | 130,6 | 55,6 | 130,2 | 6,16 | — |
| 03.03 | 09 21 59 | 52,4 | 132,6 | 52,4 | 132,7 | — | 3,60 |
| 09.03 | 12 18 09 | 53,9 | 127,6 | 53,8 | 127,5 | 6,05 | 3,64 |
| 18.03 | 05 41 35 | 54,0 | 122,1 | 53,9 | 122,2 | 6,37 | 3,58 |
| 20.03 | 09 47 02 | 55,4 | 122,2 | 55,4 | 122,2 | — | 3,57 |

Таблица 2 (окончание)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------|----------|------|-------|------|-------|------|------|
| 21,03 | 15 03 58 | 51,5 | 133,2 | 51,5 | 133,2 | 6,11 | — |
| 21,03 | 15 19 16 | 55,6 | 130,6 | 55,6 | 130,3 | 6,17 | 3,55 |
| 21,03 | 17 26 52 | 51,4 | 133,2 | 51,4 | 133,3 | 5,87 | |
| 22,03 | 07 25 19 | 53,8 | 125,1 | 53,8 | 125,0 | 5,77 | 3,19 |
| 23,03 | 07 31 16 | 51,8 | 131,0 | 51,9 | 131,0 | | 3,41 |
| 24,03 | 15 36 38 | 55,2 | 123,3 | 55,3 | 123,4 | | 3,43 |
| 26,03 | 04 22 00 | 54,0 | 136,4 | 54,1 | 136,0 | | 3,40 |
| 27,03 | 13 44 26 | 53,8 | 125,0 | 53,9 | 125,0 | | 3,23 |
| 29,03 | 07 08 10 | 54,3 | 121,6 | 54,3 | 121,5 | | 3,69 |
| 29,03 | 15 54 04 | 54,0 | 127,3 | 53,8 | 127,4 | | 3,44 |

ние для отдельных эпицентральных районов значения этих скоростей (рис. 4). В среднем значения V_S меняются от 3,4 до 3,6 км/с, V_P — от 5,5 до 6,4 км/с. Лишь в одном случае для землетрясения 25 февраля в 23 ч 50 мин с эпицентром северо-западнее станции Кировское наблюдалось аномально большое значение $V_P = 7,4$ км/с. По данным ручной обработки очаг этого землетрясения находился на глубине $H = 30$ км, т.е. вблизи подошвы земной коры.

Судя по значениям кажущихся скоростей волн \bar{P} и \bar{S} , большая часть гипоцентров землетрясений Приморья и Приамурья за январь—март 1980 г. находились в пределах гранитного слоя земной коры вблизи границы гранит-базальт. Сильнейшие события происходили вблизи подошвы, а самые слабые — в приповерхностных слоях земной коры.

Для 11 землетрясений удалось оценить отношение V_P/V_S , которое принимало значения от 1,60 до 1,81. В среднем за вычетом крайних значений $V_P/V_S = 1,74 \pm 0,04$.

1. Результаты опытной эксплуатации программы показали целесообразность использования ее для определения координат эпицентров в случае наличия станций с $R_i = 50 \div 70$ км и глубин землетрясений Приморья и Приамурья.

2. Целесообразно также использование программы для детального изучения поля кажущихся скоростей прямых сейсмических волн P и S в основных эпицентральных районах изучаемого региона. Знание величин кажущихся скоростей в свою очередь дает косвенную информацию о дислокации гипоцентров внутри земной коры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Т.А., Мишин С.В. Определение параметров очагов землетрясений Северо-Востока. — В кн.: Геофизические явления верхней атмосферы и земной коры. Магадан, 1973, с. 119—129.
2. Поплавский А.А., Поплавская Л.Н., Капанина Л.И. Определение глубины очага близкого подкорового землетрясения. — В кн.: Обработка сейсмологических наблюдений и поиск предвестников землетрясений на Дальнем Востоке. Владивосток, 1978, с. 34—42.
3. Поплавский А.А., Поплавская Л.Н., Капанина Л.И. Оценка точности определения глубин очагов дальневосточных землетрясений методом производной. — Вулканология и сейсмология, 1981, № 5, с. 74—81.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИПОЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРО-МУЙСКОГО РАЙОНА ГРУППОВЫМ СПОСОБОМ

М.Б. Вертлиб

Групповой способ определения гипоцентров землетрясений разрабатывался применительно к условиям недостаточной информации с целью обогащения совокупных данных о близкорасположенных, почти совпадающих в пространстве очагах. Использовались материалы наблюдений, полученные несколькими станциями, в районе которых происходили рои землетрясений или сильные землетрясения с афтершоками [1, 2].

Основными достоинствами группового способа является возможность объединить с более сильными землетрясениями ряд слабых, для которых индивидуальная обработка затруднена ввиду недостаточного количества наблюдений. Такое объединение данных полезно и для сильных землетрясений ($K \geq 11$), когда из-за больших размахов колебаний на сейсмограммах ближайших станций теряется самая ценная информация для определения глубины очага — моменты вступлений прямых поперечных волн.

В последние годы в связи с детальными исследованиями в Северо-Муйском районе сложилась благоприятная обстановка для определения глубин очагов землетрясений [3] и появилась возможность сравнить результаты, полученные по разным схемам определений.

Основным критерием для группирования близкорасположенных очагов землетрясений является совпадение времен пробега сейсмических волн от этих очагов до всех станций исследуемого района, или, что то же самое, совпадение моментов вступлений сейсмических волн, пересчитанных относительно закрепленного за какой-либо станцией условно выбранного момента отсчета. За такую опорную станцию для Северо-Муйского района был взят Ангаракан, где зарегистрировано максимальное число землетрясений района.

Мы считаем, что этого критерия вполне достаточно, чтобы уверенно закрепить положение очагов в пространстве, поскольку даже незначительные вариации координат эпицентров вызовут изменения времен пробега для всех станций, причем разных знаков. Это приведет как бы к удвоенным смещениям по оси времени относительно опорной станции примерно для половины наблюдающих станций, а этого уже невозможно не заметить. Дополнительным критерием служат разности фаз $\bar{S}-\bar{P}$ на ближайших к эпицентрам станциях. Это позволяет с еще большей уверенностью отбирать близкие друг к другу очаги и, кроме того, по скорости фиктивных волн определять для контроля гипоцентральные расстояния ближайших станций, что имеет большое значение при уточнении глубины.

Характеризуя чувствительность группового способа к пространственным вариациям очагов, мы ограничивались лишь приближенными качественными оценками, опираясь главным образом на экстремальные варианты, т.е. на сочетания станций, наиболее чувствительных к смещению очагов в плане, и на сочетания станций, максимально чувствительных к глубинам. В работе С.В. Крылова [4] дана количественная оценка критерия группирования, на основании которой автор приходит к выводу о возможном систематическом завышении глубин, получаемых рассматриваемым способом. Это заключение основано на представлении о том, что чувствительность разностей времен вдвое выше к смещению близкоповерхностных очагов в плане, чем по глубине. В действительности это справедливо для сочетаний тех станций, которые находятся по разные

стороны от эпицентра. Мы же опираемся на всю сеть пунктов наблюдений, и в нашем распоряжении имеются сочетания станций с одинаковой чувствительностью к смещениям очагов и в плане, и по глубине. Это сочетания очень близких станций с далекими, являющиеся самыми чувствительными к глубинам.

Практически группирование землетрясений осуществляется следующим образом. Весь исследуемый материал приводится к матричной форме, т.е. моменты вступлений однотипных сейсмических волн на всех станциях пересчитываются относительно выбранного момента для опорной станции и записываются для отдельных землетрясений столбцами, где каждая строка соответствует определенной станции. Станции располагаются в порядке возрастания эпицентральных расстояний для очагов, относящихся к центральной части исследуемого района.

После того как матрица расписана, ее следует разрезать по столбцам и разложить их в порядке возрастания моментов для самой чувствительной станции, для которой интервал значений моментов самый большой. Скорее всего, такой станцией согласно упомянутому выше критерию чувствительности окажется станция, расположенная по отношению к исследуемому "облаку" очагов примерно на тех же расстояниях, что и опорная станция, но с другой стороны.

Далее осуществляется выбор групп, в каждой из которых согласуются моменты всех станций.

В результате наше "облако" распадается на небольшие "капли", по которым мы можем представить картину жизни земной коры, если припишем получившиеся групповые результаты каждому землетрясению, попадающему в определенную группу, и таким образом проследим распределение испытываемых событий во времени.

Необходимо также отметить, что в результате группирования близко-расположенных очагов землетрясений разной силы и дальнейшего осреднения групповой информации представляется возможность не только "обогатить" исследуемый материал количественно, но и снизить уровень случайных ошибок, что имеет немаловажное значение для более точных оценок основных параметров землетрясения — момента его возникновения T_0 , координат эпицентра и глубины очага.

При определении этих параметров почти все графические методы опираются на известные времена пробега сейсмических волн, т.е. решение задачи начинается с установления параметра T_0 . В результате допускаемых неточностей в определении момента очага радиусы засечек могут оказаться либо меньше (в случае завышения T_0), либо больше (при его занижении), чем эпицентральные расстояния. Точность определения эпицентра при этом пострадает меньше, чем точность глубины очага, для определения которой, кроме истинного значения T_0 , необходимо знать еще скорости распространения используемых волн для установления гипоцентральных расстояний до ближайших станций (можно, конечно, эти расстояния установить независимым путем, например, по разности фаз $S-P$). Наиболее близкое к истинному значение T_0 определяется либо путем подбора (при несогласованности засечек), либо построением графика Вадати, если такая возможность имеется.

В применяемом нами аналитическом варианте решения задачи с использованием ЭВМ осуществляется другой порядок определения параметров землетрясения: решается система переопределенных линейных уравнений с двумя неизвестными — координатами эпицентра φ_3, λ_3 , [5].. Поскольку момент очага и его глубина являются индивидуальными характеристиками землетрясения, исключение их не влияет на точность

Таблица 1*

Определение параметров группы землетрясений Ангарканского роя 1979 г.

| Данные о землетрясениях, взятые из бюллетеней | | | | |
|---|---|------------|------------|----------|
| Дата | 8.06.79 | 15.06.79 | 22.06.79 | 21.07.79 |
| ч. мин. с | 13 26 10 | 03 29 47 | 06 56 27 | 00 52 21 |
| $\varphi_3^{\circ} N$ | 56,32 | 56,34 | 56,33 | 56,35 |
| $\lambda_3^{\circ} E$ | 113,51 | 113,55 | 113,52 | 113,50 |
| H , км | — | — | — | — |
| K | 9 | 5 | 6 | 6 |
| Станция | Матрица приведенных моментов вступлений \bar{S} -волн (в скобках значения разностей $\bar{S} - \bar{P}$) | | | |
| Ангаркан | — | 60,0 (1,9) | 60,0 (1,9) | — |
| Тоннельный | 60,3 | — | 60,0 | 60,3 |
| Сеvaro-Муйск | 61,3 | 61,4 | 61,4 | — |
| Озерная | 65,4 | — | 65,2 | 65,5 |
| Ковокта | 67,0 | 67,1 | 67,1 | 66,9 |
| Оран | — | — | — | — |
| Неляты | 95,3 | — | — | — |
| Кумора | 99,1 | — | — | — |
| Бодайбо | 104,0 | — | — | — |
| Калар | 126,1 | — | — | — |
| Северобайкальск | 133,5 | — | — | — |
| Чара | 140,8 | — | — | — |
| Ново-Ангарск | 129,1 | — | — | — |
| Бодон | 163,2 | — | — | — |
| Тупик | 183,8 | — | — | — |
| Чита | 190,0 | — | — | — |
| Тырган | 224,7 | — | — | — |
| Хапчаранга | 265,0 | — | — | — |
| Аршан | 299,0 | — | — | — |

определения координат эпицентра. Что касается скорости распространения поперечных сейсмических волн, вообще говоря, различной по разным трассам, то ее можно считать близкой к средней скорости, либо постараться свести к минимуму различия в ее значениях, накладывая соответствующие ограничения на сочетания подбираемых четверок станций.

Таким образом, задача сведется к решению системы переопределенных линейных уравнений с двумя неизвестными [5] — координатами эпицентра φ_3, λ_3 .

Определив координаты эпицентра, оцениваем погрешность определения по согласованию получившихся эпицентральных расстояний Δ_i станций сети с их моментами \bar{S}_i . Убедившись в надежности определения эпицентра (в пределах 5 км), можно переходить к определению остальных параметров, например к глубине H .

Мы использовали два независимых подхода к определению H . Оба они опираются на знание скоростей распространения поперечных (V_s) и фиктивных (V_ϕ) волн в близочаговой зоне. Можно в первом приближении пользоваться их средними значениями — 3,5 и 8,3 км/с соответственно. Первый путь использовался в программе, составленной в лаборатории сейсмологии ИЗК СО АН СССР более 15 лет назад [6]. В этом случае рассчитывается годограф, получаемый после определения эпицентра, оп-

38

| Данные о землетрясениях, взятые из бюллетеней | | | | Результаты машинной обработки групповой информации | | |
|---|------------|------------|------------|--|---------------|---------------------|
| 21.07.79 | 25.09.79 | 26.09.79 | 8.10.79 | $\varphi_3 = 56,32^{\circ} N$ | | |
| 02 37 40 | 11 59 44 | 03 51 53 | 06 37 32 | $\lambda_3 = 113,52^{\circ} E$ | | |
| 56,35 | 56,34 | 56,34 | 56,36 | $\delta E = 2\delta\Delta = 2,1$ км | | |
| 113,50 | 113,50 | 113,50 | 113,51 | $V_K = 3,56$ км/с | | |
| — | — | — | 11 | | | |
| 6 | 4 | 4 | 6 | | | |
| Матрица приведенных моментов вступлений \bar{S} -волн (в скобках значения разностей $\bar{S} - \bar{P}$) | | | | $\bar{S}_{\text{оср}} (\bar{S} - \bar{P})$ | Δ , км | $\delta\Delta$, км |
| 60,0 (1,9) | 60,0 (1,9) | 60,0 (1,8) | 60,0 (1,9) | 60,0 (1,9) | 9,8 | — |
| 60,3 | — | — | 60,4 | 60,3 | 10,8 | — |
| — | 61,2 | — | 61,4 | 61,3 | 14,7 | — |
| — | 65,6 | 65,6 | 65,3 | 65,4 | 28,6 | — |
| 67,1 | 67,0 | 66,9 | 67,1 | 67,0 | 35,3 | — |
| — | — | — | 69,4 | 69,4 | 45,2 | — |
| — | — | — | — | 95,3 | 135,6 | -0,2 |
| — | — | — | — | 99,1 | 151,8 | 2,5 |
| — | — | — | — | 104,0 | 167,0 | 0,3 |
| — | — | — | — | 126,1 | 244,5 | -0,8 |
| — | — | — | — | 133,5 | 269,9 | -1,7 |
| — | — | — | — | 140,8 | 297,5 | -0,1 |
| — | — | — | — | 129,1 | 253,8 | -0,4 |
| — | — | — | — | 163,2 | 363,3 | -10,6 |
| — | — | — | — | 183,8 | 454,2 | 8,0 |
| — | — | — | — | 190,0 | 477,9 | 10,0 |
| — | — | — | — | 224,7 | 608,1 | 18,4 |
| — | — | — | — | 265,0 | 737,3 | 6,2 |
| — | — | — | — | 299,0 | 870,6 | 20,0 |

ределяется в первом приближении кажущаяся скорость по линейной части годографа для расстояний с $\Delta_i \geq 80$ км, вычисляются невязки для всех станций и по их удвоенному среднеквадратичному значению оценивается степень согласованности полученного решения с исходными данными.

Что касается близких станций, то их невязки надо определять с учетом скоростей того района, где происходит трасса сейсмической волны. Привязываться к значениям, которые получаются по линейной части годографа, нельзя, так как они являются кажущимися и отражают ситуацию пробега волн в иных условиях. Лучше всего взять среднюю точку годографа как самую надежную и провести прямую с наклоном, отвечающим скорости в районе близких станций. Тогда получим невязки с годографом, равные разностям D_i и Δ_i , т.е. будем иметь возможность оценить глубину в первом приближении.

Второй путь не зависит от получаемого годографа, а опирается на известную скорость фиктивных волн и разность фаз $\bar{S} - \bar{P}$ для ближайших станций. Определяем для них D_i и по известным Δ_i , отвечающим полученному эпицентру, находим глубину очага из треугольника эпицентр—гипоцентр—станция.

Если эпицентр найден верно и значения скоростей, принятые нами, близки к истинным, решения по этим двум схемам будут очень близки.

39

Таблица 2

Значения глубин очагов, отвечающие различным значениям скоростей

| Станция | Δ , км | $V_S = 3,5$ км/с; $V_\Phi = 8,3$ км/с | | | $V_S = 3,4$ км/с; $V_\Phi = 7,9$ км/с | | |
|--------------|---------------|---------------------------------------|------------|---------------|---------------------------------------|------------|---------------|
| | | $\delta\Delta$, км | H_S , км | H_Φ , км | $\delta\Delta$, км | H_S , км | H_Φ , км |
| Ангаракан | 9,8 | -1,8 | 6 | 13 | -5,1 | 11 | 11 |
| Тоннельный | 10,8 | -1,9 | 7 | — | -5,1 | 12 | — |
| Северо-Муйск | 14,7 | -1,5 | 7 | — | -4,7 | 13 | — |

Примечание: Δ — эпицентральный расстояние; $\delta\Delta$ — невязка с годографом; H_S и H_Φ — глубина очага, вычисленная по невязке с годографом и по разности $S-P$ соответственно.

Таблица 3

Распределение землетрясений, обработанных групповым способом, по глубинам очагов и энергиям

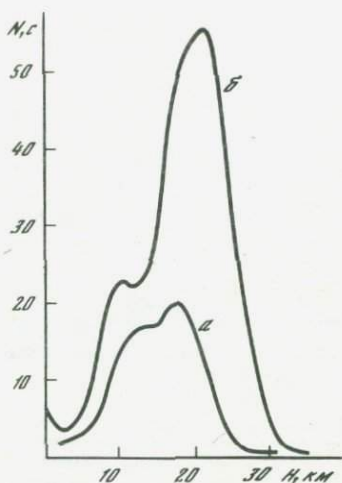
| Ангараканский рой 1979 г. | | | | | | | | | | |
|---------------------------|------------|-----|----|----|----|---|----|----|----|--|
| H | $K \leq 4$ | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| 0 | | | | | | | | | | |
| 4 | 1 | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | |
| 6 | | 1 | 1 | | | | | | | |
| 7 | 1 | 1 | 2 | 1 | | | | | | |
| 8 | 7 | 1 | 1 | 3 | | 1 | | | | |
| 9 | 26 | 21 | 6 | 6 | | 2 | | | | |
| 10 | 57 | 79 | 38 | 19 | 10 | 1 | 2 | 1 | 1 | |
| 11 | 142 | 118 | 78 | 46 | 18 | 3 | 1 | | | |
| 12 | 87 | 114 | 64 | 29 | 5 | 2 | 2 | | | |
| 13 | 106 | 103 | 49 | 35 | 10 | 6 | 1 | | | |
| 14 | 45 | 49 | 17 | 5 | 2 | 1 | | | | |
| 15 | 5 | 5 | 3 | 2 | 1 | | | | | |
| 16 | 1 | | | | | | | | | |
| 17 | | | | | | | | | | |
| 18 | | | | | | | | | | |
| 19 | | | | | | | | | | |
| 20 | | | | | | | | | | |
| 21 | | | | | | | | | | |
| 22 | | | | | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | |
| 24 | | | | | | | | | | |
| 25 | | | | | | | | | | |
| 26 | | | | | | | | | | |
| 27 | | | | | | | | | | |
| 28 | | | | | | | | | | |
| 29 | | | | | | | | | | |
| 30 | | | | | | | | | | |
| 31 | | | | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | | | | |
| 33 | | | | | | | | | | |
| 34 | | | | | | | | | | |
| 35 | | | | | | | | | | |
| 36 | | | | | | | | | | |

Рассмотрим в качестве примера группу землетрясений, относящихся к Ангараканскому рою 1979 г. (табл. 1, 2).

Моменты вступлений сейсмических волн и результаты индивидуальных определений параметров этих землетрясений заимствованы из Бюллетеня сейсмичности Прибайкалья и Бюллетеня сети станций Северо-Муйского района за 1979 г. Самое сильное землетрясение, взятое в данную группу, имеет энергетический класс $K-9$ и записано на 14 станциях региональной сети Прибайкалья и на 4 станциях локальной сети Северо-Муйского района. Остальные землетрясения, взятые в группу, настолько слабые, что записаны лишь близкими (в количестве от 3 до 6) станциями.

В левой части табл. 1 приведены исходные данные в виде матрицы моментов, где по столбцам расписаны моменты вступлений сейсмических волн для отдельных землетрясений, а по строкам — их порядок вступления на станции сети.

| Землетрясения Северо-Муйского района за 1977—1979 гг. (исключая Ангараканский рой) | | | | | | | | | | |
|--|-----|----|----|----|----|---|----|----|----|---|
| | < 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| | 2 | 5 | 9 | 9 | 1 | | | | | |
| | | | 1 | | | | | | | |
| | | 2 | 5 | 1 | 2 | | | | | |
| | | 1 | 4 | 1 | | | | | | |
| | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | | | | | |
| | 1 | | 8 | 6 | 2 | 2 | | | | |
| | 5 | 8 | 6 | 7 | 3 | | | | | |
| | 4 | 4 | 5 | 4 | 1 | 1 | | | | |
| | 7 | 7 | 10 | 6 | 1 | 1 | | | | |
| | 2 | 4 | 7 | 6 | 2 | | | | | |
| | 4 | 8 | 4 | 7 | 1 | | | | | |
| | 4 | 3 | 4 | 5 | 3 | 1 | | | | |
| | 2 | 4 | 6 | 11 | 3 | 2 | | | | |
| | 2 | 7 | 4 | 7 | 8 | | | | | |
| | | 9 | 9 | 15 | 4 | 1 | | | | 1 |
| | 8 | 13 | 26 | 35 | 9 | | 2 | | | |
| | 2 | 4 | 12 | 8 | 5 | | | | | |
| | 5 | 8 | 17 | 17 | 5 | 1 | | | | |
| | 6 | 14 | 15 | 13 | 4 | | 1 | | | |
| | 1 | 12 | 24 | 20 | 11 | 1 | 2 | | | |
| | 5 | 11 | 14 | 14 | 13 | 3 | 2 | | | |
| | 1 | 5 | 14 | 6 | 8 | 3 | | | | |
| | | 2 | 8 | 12 | 6 | 2 | 1 | | | |
| | 1 | 3 | 10 | 5 | 5 | 3 | | | | |
| | 1 | | 3 | 11 | 8 | | | | | |
| | | 1 | 3 | 3 | 3 | | 1 | | | |
| | | 1 | 1 | 3 | 2 | | | | | |
| | | | | 1 | | 1 | | | | |
| | | | 1 | | 1 | | | | | |
| | | | | | 1 | | | | | |
| | | | | | | 1 | | | | |
| | | | | | | | 1 | | | |
| | | | | | | | | 2 | | |



Р и с. 1. Кривые распределения очагов по глубинам для 300 индивидуально обработанных землетрясений (а) и 825, обработанных групповым способом (б)

В правой части таблицы приведены результаты машинной обработки осредненной информации по первым 12 станциям (6 станций региональной сети и 6 — локальной).

Как видим из расчетов, координаты осредненного эпицентра $\varphi_3 = 56,32^\circ$ N и $\lambda_3 = 113,52^\circ$ E хорошо согласуются с теми значениями, которые получены по индивидуальным определениям для каждого очага, входящего в группу, и приведены над матрицей исходных дан-

ных. Для полученного осредненного эпицентра приведены расстояния Δ до всех станций и величины $\delta\Delta$, равные невязкам эпицентральных расстояний с линейной частью годографа, отвечающего указанной величине кажущейся скорости $V_k = 3,56$ км/с. Величина возможной ошибки $\delta E = 2\delta\Delta = 2,1$ км говорит о хорошей согласованности исходных данных с полученным эпицентром.

Значения глубины вычислены по невязкам трех ближайших станций (табл. 2) для значений скорости сейсмических волн $V_{\bar{S}} = 3,5$ км/с и $V_{\bar{S}'} = 3,4$ км/с. Кроме того, по разности фаз $\bar{S}-\bar{P}$ для станции Ангаракан уточнена глубина при соответствующих значениях скорости фиктивных волн $V_{\Phi} = 8,3$ км/с и $V_{\Phi'} = 7,9$ км/с. Как видим из расчетов, наилучшее согласие для значений H получено по скоростям $V_{\bar{S}} = 3,4$ км/с и $V_{\Phi} = 7,9$ км/с. Значение глубины с учетом возможной ошибки ее определения равно 11 ± 2 км и совпадает с определением, сделанным индивидуально для землетрясения 8.10.79 — единственного из всей группы.

Всего за три года (1977—1979) групповым способом обработано 2270 землетрясений, 1445 из которых составляют землетрясения роя 1979 г, а 825 относятся ко всему Северо-Муйскому району. За это же время в Бюллетене сети станций Северо-Муйского района приведены данные о глубинах очагов примерно для восьмисот землетрясений, причем около пятисот определений приходится на землетрясения роя.

На рис. 1 приведены для сравнения кривые распределения очагов по глубинам для 300 индивидуально обработанных землетрясений и 825 землетрясений, обработанных групповым способом с использованием гипоцентральных расстояний, отвечающих скоростям $V_{\bar{S}} = 3,5$ км/с и $V_{\Phi} = 8,3$ км/с. Землетрясения роя здесь не учтены. Как видно из рисунка, характер распределения в обоих случаях одинаков, несмотря на то, что

Р и с. 2. Карта-схема пространственного расположения групп землетрясений, происшедших в 1977 г. в Северо-Муйском районе

1—3 — группы землетрясений с $K < 7, 8$ и 9 соответственно; цифрами в кружках обозначены значения глубин; 4—6 — разломы: 4 — активные в кайнозое (а — установленные, б — предполагаемые); 5 — активные в четвертичное время (а — сейсмогенерирующие, б — участки сейсмогенного обновления); 6 — генетические типы разломов (а — сбросы и взбросы, б — сдвиги); 7 — сейсмогенные обвалы (а — обвальное тело, б — бровка стенки отрыва) (по М.Г. Демьяновичу [7])

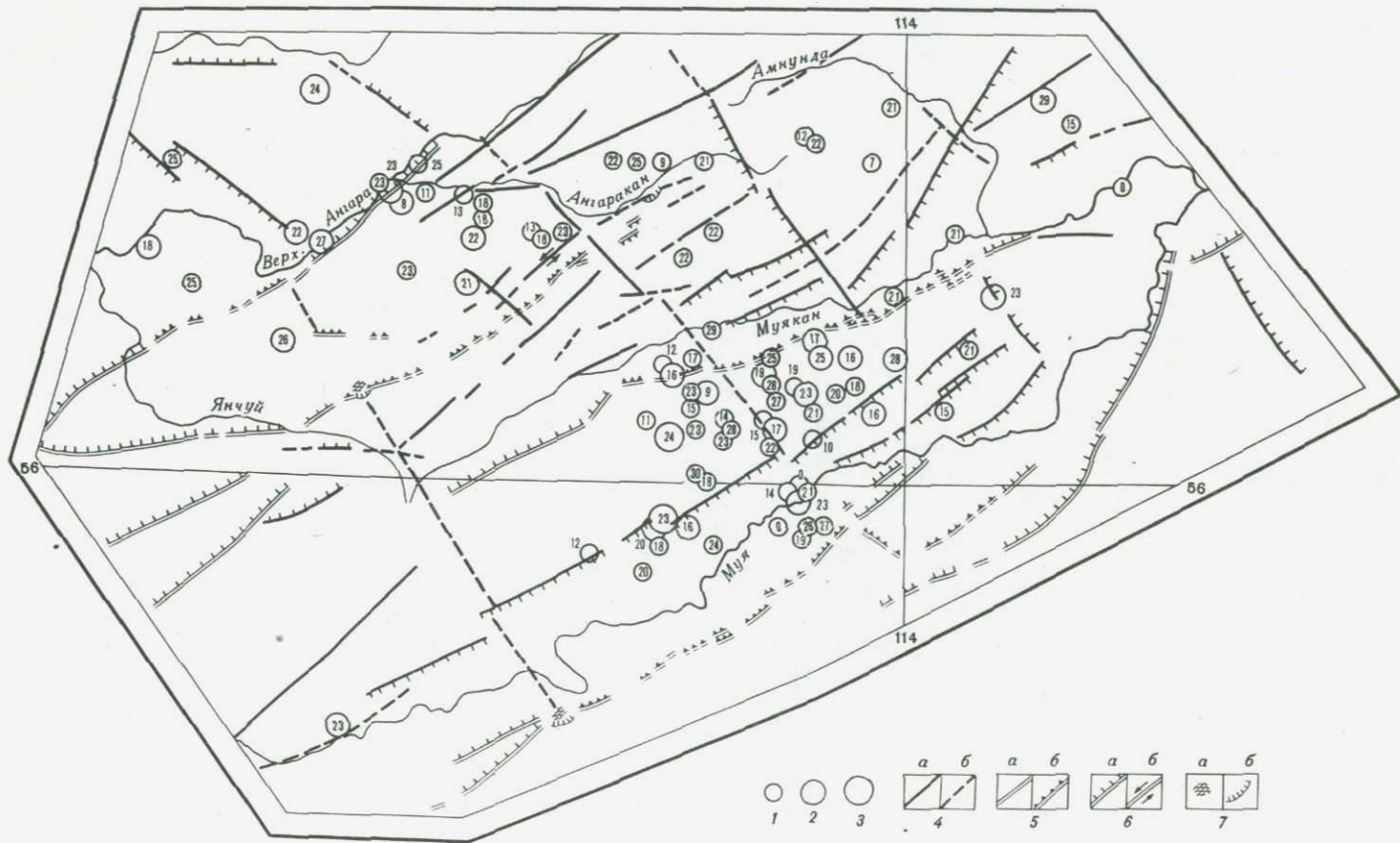




Рис. 3. Карта-схема пространственного расположения групп землетрясений Северо-Муйского района за 1978 г.
 Размеры кружков отражают максимальную энергию землетрясений в группах (обозначения см. на рис. 2)

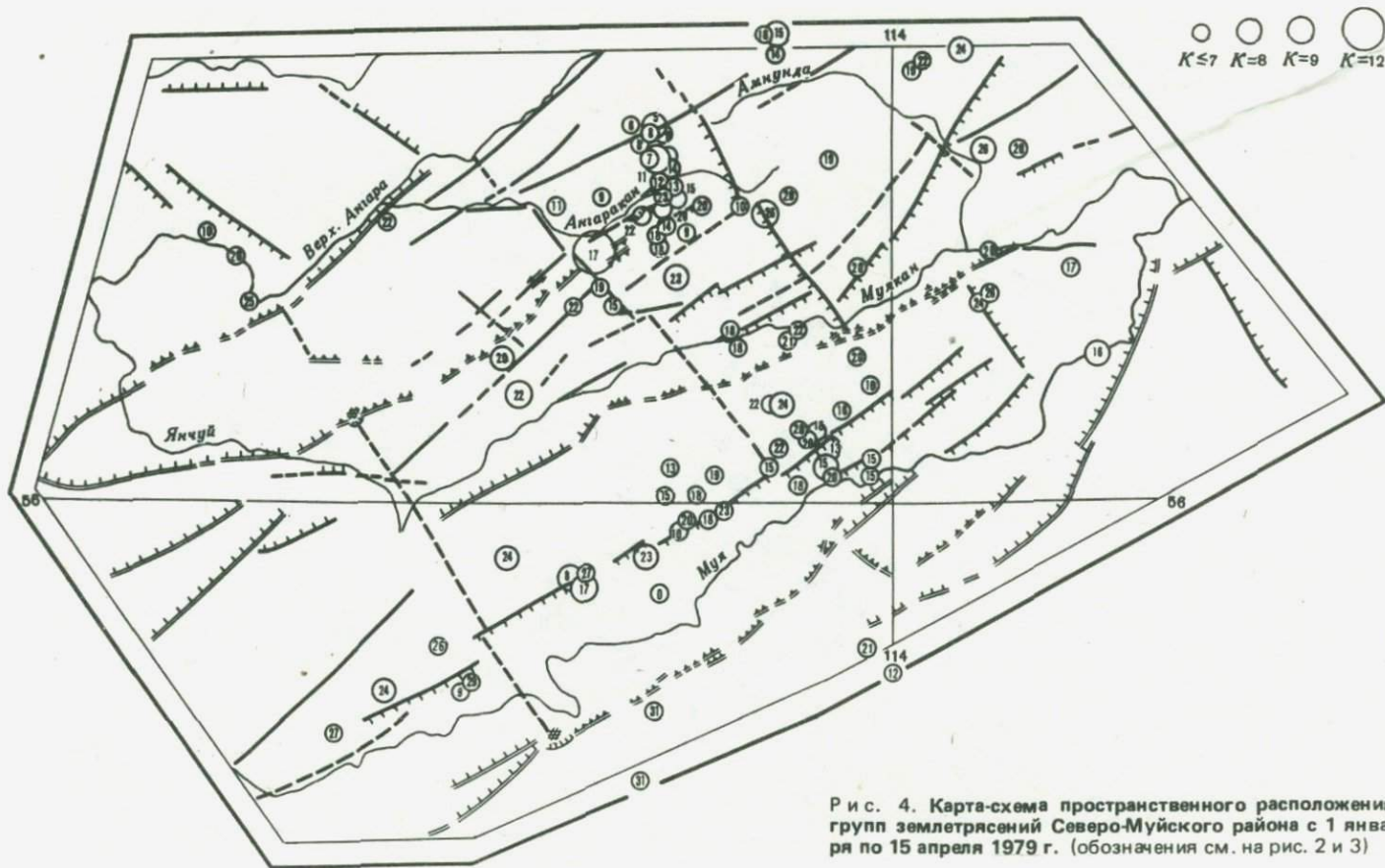
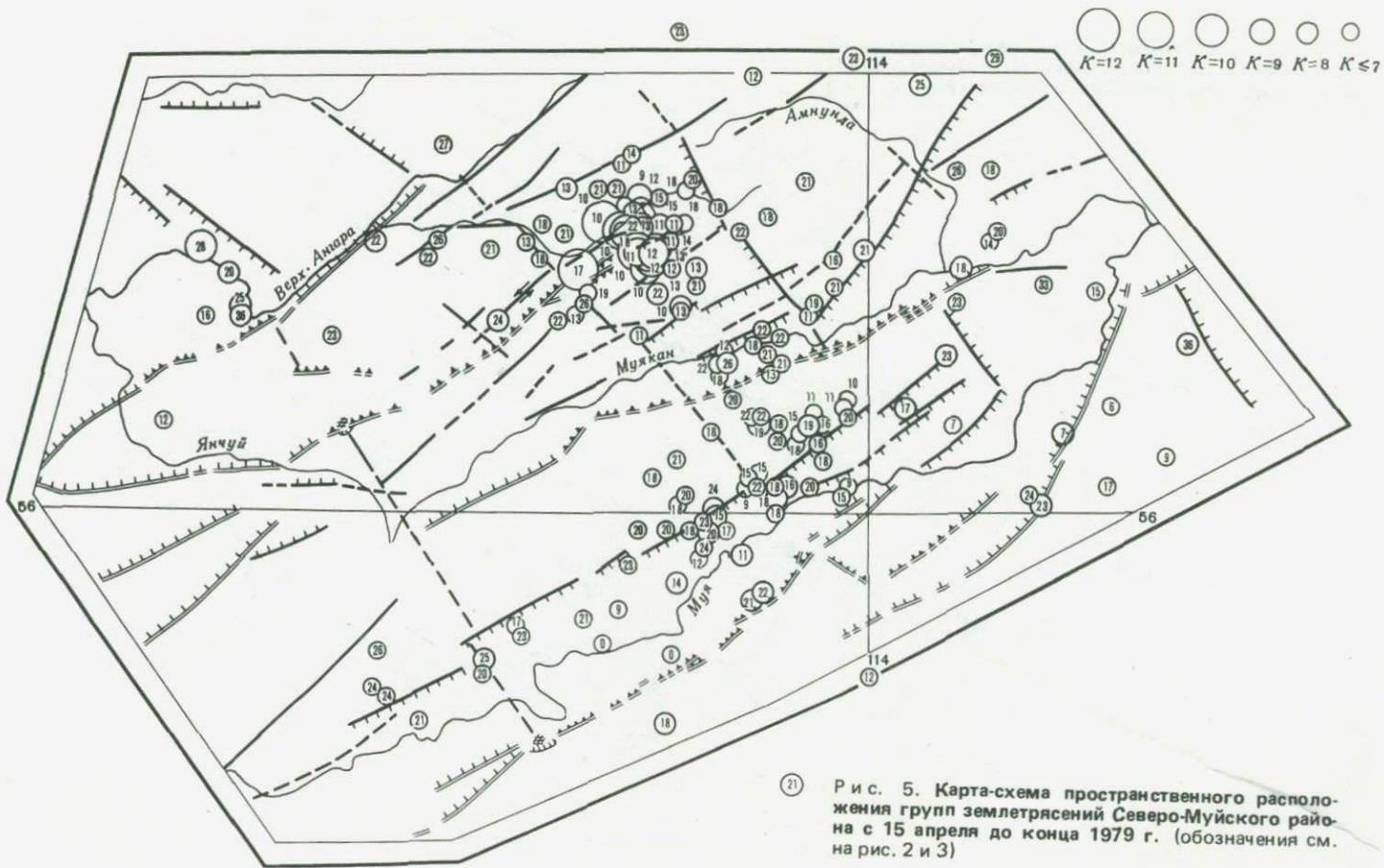


Рис. 4. Карта-схема пространственного расположения групп землетрясений Северо-Муйского района с 1 января по 15 апреля 1979 г. (обозначения см. на рис. 2 и 3)



21 Р и с. 5. Карта-схема пространственного расположения групп землетрясений Северо-Муйского района с 15 апреля до конца 1979 г. (обозначения см. на рис. 2 и 3)

в групповом способе использовались скорости $V_{\bar{S}} = 3,5$ км/с и $V_{\bar{\Phi}} = 8,3$ км/с вместо $V_S = 3,4$ км/с и $V_{\Phi} = 7,9$ км/с, установленных для Северо-Муйского района в результате детального исследования гипоцентрального поля [3].

Следует отметить, что, по данным ГСЗ, полученным Б.П. Мишенькиным с соавторами, в Северо-Муйском районе чередуются области с пониженными и повышенными значениями скоростей продольных сейсмических волн относительно среднего значения $6,2$ км/с, отвечающего значениям $V_{\bar{S}} = 3,5$ км/с и $V_{\bar{\Phi}} = 8,3$ км/с. Отклонения значений скорости $V_{\bar{F}}$ от среднего достигают $\pm 0,4$ км/с. Поэтому при определениях глубин очагов можно допускать некоторую вариацию в скоростях и определять глубину по тем близким станциям, где есть для контроля разность фаз $\bar{S} - \bar{P}$. Совпадение значений глубин, вычисленных двумя независимыми способами, укажет не только на вероятнейшую величину глубины, но и значение скорости по трассе очаг—близкая станция.

Пространственное расположение групп очагов отражено на четырех картах-схемах по годам (рис. 2–5), причем последний год (1979) разбит на две части. Это сделано специально, так как 15 апреля 1979 г. произошло землетрясение с $K-12$, после которого в районе станции Ангаракан резко возросла сейсмичность: с 26 мая начался крупный рой землетрясений. На рис. 4 отражена обстановка в период, предшествующий землетрясению 15 апреля, а на рис. 5 — в период сразу после него (само землетрясение 12-го класса показано на обоих рисунках). На всех картах-схемах энергетические характеристики групп землетрясений отражены одинаково: величина кружка соответствует самому сильному землетрясению в группе. Разломы приведены по карте-схеме М.Г. Демьяновича [7].

В табл. 3 приведено распределение очагов по глубинам в зависимости от энергетического класса K для Ангараканского роя 1979 г. и для землетрясений всего Северо-Муйского района за 3 года, исключая рой. Наиболее сильные землетрясения роя (с $K-12$ и -11) произошли на глубине 10 км, что отвечает средней глубине очагов роя, занимающих интервал от 4 до 16 км. Очаги этих землетрясений располагались на краю очаговой зоны со стороны эпицентра землетрясения 15 апреля с $K-12$ (рис. 5). Это последнее землетрясение, в свою очередь, произошло на глубине, отвечающей средней глубине очагов землетрясений, зарегистрированных в 1977–1979 гг., но не относящихся к рою.

Из рис. 3 и 4 видно, что Ангараканский рой произошел не случайно а был подготовлен слабыми землетрясениями с конца 1978 г. и в начале 1979 г. Похоже на то, что землетрясение 15 апреля с $K-12$, которое считается "провокатором" роя [3], само вызвано начинающимся роем. Такое предположение не противоречит выводам Ю.М. Тейтельбаума и В.С. Пономарева [8] о том, что землетрясения с $K-12$ очень часто (около 77% случаев) предваряются роями слабых землетрясений за полтора года или менее.

Как видно из табл. 3, очаги слабых землетрясений встречаются в различных слоях коры. Этот факт свидетельствует об их высокой информативности, которую следует иметь в виду при детальных исследованиях в отдельных районах. Сейсмологическая информация для этих районов может быть использована наиболее полно, если подключить к ней имеющийся материал наблюдений за ряд предыдущих лет по более сильным очагам. Это позволит уточнить гипоцентральное поле групповым способом, объединяя наблюдения по близким и удаленным станциям.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вертлиб М.Б.* К определению глубин очагов землетрясений в Прибайкалье. — Геология и геофизика, 1978, № 9, с. 141—146.
2. *Вертлиб М.Б.* Определение глубины очагов землетрясений групповым способом в некоторых районах Прибайкалья. — В кн.: Сейсмические исследования в Восточной Сибири. М.: Наука, 1981, с. 82—88.
3. *Боровик Н.С., Аниканова Г.В.* Некоторые результаты интерпретации детальных сейсмологических наблюдений в Северо-Муйском районе Байкальской сейсмической зоны. — Геология и геофизика, 1982, № 9, с. 122—124.
4. *Крылов С.В.* О глубинах Байкальских землетрясений и сейсмоконтролирующих факторах. — Геология и геофизика, 1980, № 5, с. 97—112.
5. *Тресков А.А., Вертлиб М.Б.* Объективное определение эпицентров близких землетрясений. М.: Наука, 1973. 75 с.
6. *Вертлиб М.Б.* Объективное определение эпицентров близких землетрясений на ЭВМ. — В кн.: Материалы конф. молодых науч. сотр. Иркутск; ИЗК СО АН СССР, 1968, с. 152—159.
7. *Демьянович М.Г., Курушин Р.А., Авдеев В.А.* Сейсмологические особенности Северо-Муйского участка трассы БАМ. — В кн.: Геологические и сейсмические особенности района БАМ. Новосибирск: Наука, 1978, с. 115—126.
8. *Тейтельбаум Ю.М., Пономарев В.С.* Рои слабых землетрясений в прогнозе сильных событий. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1980, № 1, с. 21—33.

УДК 518.550

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ГИПОЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Н.Б. Пивоварова

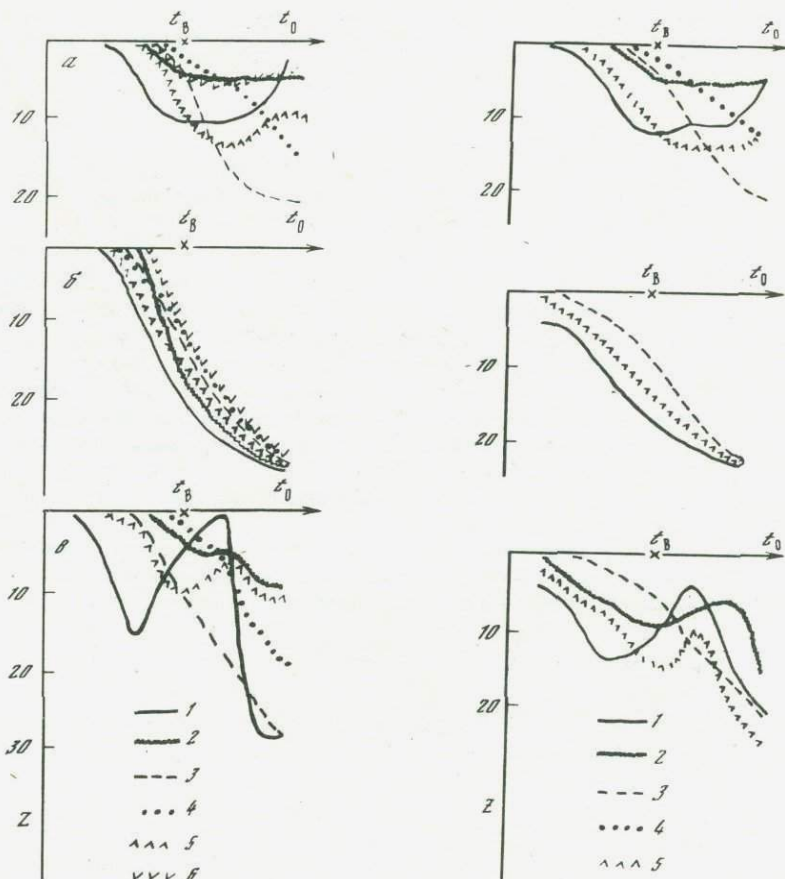
При восстановлении скоростной модели среды в сейсмоактивном регионе по региональным данным возникает необходимость получения однородных данных о координатах гипоцентров местных землетрясений. Опыту машинного определения координат гипоцентров землетрясений Кавказа посвящена работа [1] настоящего сборника. В ней рассматриваются вопросы точности определения координат, главным образом глубины очагов.

Определение координат гипоцентров землетрясений Кавказа проводится на основе информации о первых вступлениях *S*- и *P*-волн на сети сейсмических станций региона. Эти данные анализируются совместно для определения времени начала землетрясения t_0 , которое затем используется при уточнении координат гипоцентра. При этом, так как данные о скоростях распространения *P*-волн в регионе более достоверны и надежны, а вступления *P*-волн более четкие, используются только во времена первых вступлений *P*-волн. Координаты гипоцентра определяются путем минимизации функционала

$$\Phi(x, y, z) = \sum_k a_k (\tau_k(x, y, z) + t_0 - t_k)^2, \quad (1)$$

где $\tau_k(x, y, z)$ — время пробега *P*-волны до *k*-станции, вычисленное в данной скоростной модели среды; t_0 — время начала землетрясения; t_k — время регистрации первого вступления *P*-волны на *k*-станции; a_k — веса различных станций.

Для анализа использовались два варианта задания модели среды: 3DМ — блоковая модель среды Кавказа, где теоретическое время пробега вычис-



Р и с. 1. Зависимость глубины очага землетрясения от времени в очаге t_0 при различных минимизируемых функционалах и моделях среды

Землетрясение №1503 (а); 1510 (б); 1507 (в); 1 — функционал Φ_1 , среда 1DIM; 2 — функционал Φ_1 , среда 3DIM; 3 — функционал Φ_2 , среда 1DIM; 4 — функционал Φ_2 , среда 3DIM; 5 — функционал Φ_3 , среда 1DIM; 6 — функционал Φ_3 , среда 3DIM

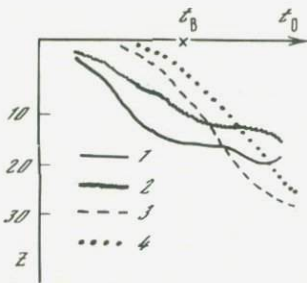
Р и с. 2. Зависимость глубины очага землетрясения от времени в очаге для характерных групп землетрясений

Тип I, II, III (обозначения см. на рис. 1)

лялось для необходимой глубины и эпицентрального расстояния; 1DIM — одномерная модель, задаваемая теоретическими годографами для серии глубин и эпицентральных расстояний. В блоковой модели регион разбит на 6 блоков, в каждом из которых скоростная модель задается 6 параметрами: толщина слоя осадков и скорость в них, толщина коры, скорость в верхах мантии, градиентная модель скорости в коре (см. [1]).

Для учета влияния ближних и дальних станций вводились три варианта весов:

$$a_k^I = w_k / \tau_k^2, \quad a_k^{II} = w_k, \quad a_k^{III} = w_k / \tau_k. \quad (2)$$



Р и с. 3. Средняя зависимость глубины очага землетрясения от времени для всех рассматриваемых очагов (обозначения см. на рис. 1)

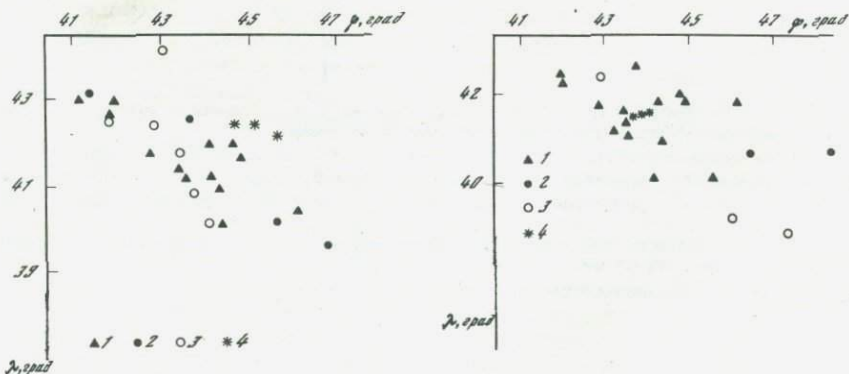
Здесь W_k — веса описывающие надежность регистрации P -волны на k -станции. В методических расчетах $W_k = 1$.

Различные варианты весов соответствуют различным предположениям о характере ошибок в измеренных временах. Пусть измеренное время пробега $\Delta t_k = t_k - t_0$ можно представить в виде $\Delta t_k = \tau_k(x, y, z) + \epsilon_k$, где $\tau_k(x, y, z)$ — полностью детерминирована и известна с точностью до параметров x, y, z — координат очага; ϵ_k — случайная компонента. Исследование характеристик случайной компоненты проводилось разными авторами. Так, работы А.В. Николаева [2], проведенные в различных районах страны, подтверждают близкий к нормальному закон распределения флуктуаций времен и логарифмов амплитуд, причем среднее квадратическое флуктуаций растет с расстоянием.

В предположении нормального закона плотности распределения вероятности величин ϵ_k плотность распределения вероятности всей совокупности значений Δt_k запишется в следующем виде:

$$\rho(\epsilon) = C \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_k \epsilon_k R_{ki}^{-1} \epsilon_i\right),$$

где R — матрица вторых моментов распределения вероятностей вектора ϵ . Если рассматривать компоненты вектора ϵ_k , значит, и Δt_k , некоррелиро-



Р и с. 4. Расположение эпицентров землетрясений (тип III) относительно системы станций

1 — станция, зарегистрировавшая 3 землетрясения № 1508, 1509, 1510; 2 — 1 землетрясение № 1509; 3 — 2 землетрясения № 1509 и 1510; 4 — положение очага землетрясения

Р и с. 5. Расположение эпицентров землетрясений (тип I) относительно системы станций

1 — станция, зарегистрировавшая 3 землетрясения № 1503, 1504, 1505; 2 — 1 землетрясение № 1504; 3 — 2 землетрясения № 1504, 1505; 4 — положение очага землетрясения

ванными, то $R_{ki} = \sigma_k^2$ при $k = i$, $R_{ki} = 0$ при $k \neq i$, σ_k — дисперсия величины Δt_k . Тогда, следуя принципам теории оптимальной интерпретации, для нахождения параметров x, y, z следует минимизировать величину Φ :

$$\begin{aligned} \Phi &= \sum_{k, i} (\tau_k(x, y, z) - \Delta t_k) R_{ki}^{-1} (\tau_i(x, y, z) - \Delta t_i) = \\ &= \sum_k \frac{(\tau_k(x, y, z) - \Delta t_k)^2}{\sigma_k^2}. \end{aligned}$$

Можно выделить различные физические причины, приводящие к появлению соответствующих случайных флуктуаций: ошибки измерения времен на сейсмостанциях ($\sigma_k = \text{const}$), неточность определения параметров среды (для случая однородной среды $\sigma_k^2 = \tau_k^2 \sigma_v^2 \approx \tau_k^2$), наличие мелких неоднородностей в строении среды ($\sigma_k^2 \approx \tau_k$). Три рассмотренных варианта случайных флуктуаций во временах приводят к различным типам функционалов, приведенных в (2). Функционал с весом a_k следует использовать, если теоретически времена вычисляются в заданной скоростной модели. Функционал с весом a_k^{II} отвечает ситуации, когда теоретические времена для всех глубин и эпицентральных расстояний известны с одинаковой ошибкой.

Таким образом далее будут приведены некоторые результаты методических расчетов с использованием трех функционалов для определения координат гипоцентров землетрясений:

$$\begin{aligned} \Phi_1(x, y, z) &= \sum_k \frac{(\tau_k(x, y, z) + t_0 - t_k)^2}{\tau_k^2}, \\ \Phi_2(x, y, z) &= \sum_k (\tau_k(x, y, z) + t_0 - t_k)^2, \\ \Phi_3(x, y, z) &= \sum_k \frac{(\tau_k(x, y, z) + t_0 - t_k)^2}{\tau_k}. \end{aligned} \quad (3)$$

В первом варианте главную роль в функционале играют ближние станции, во втором варианте невязки ближних и дальних станций представлены с равным весом. Третий вариант является промежуточным.

Для землетрясений 1980 г. (№ 1500—1520 по каталогу) проводились определения координат при разных вариантах весов, моделей сред и при разных t_0 , отличающихся от определенного на $\pm 0,5K$ с $K = 1, 3, 5, 7$. Анализу подверглись глубины гипоцентров землетрясений, в частности кривые $z(t_0)$. По виду кривых $z(t_0)$ данные можно разбить на три типа: для типа I кривая $z(t_0)$ имеет один максимум, для типа II $z(t_0)$ имеет постоянный наклон и для типа III — промежуточный. На рис. 1 представлены такие кривые для землетрясений № 1503, 1510, 1507. Для кривых типа II изменение t_0 приводит к изменению глубины очага. Изменение веса или модели среды не влияет существенно на вид кривой $z(t_0)$. На рис. 2 приведены аналогичные кривые для серий землетрясений. Усреднение кривых $z(t_0)$ происходило путем совмещения отметки $t_0 = t_B$ для каждого отдельного землетрясения, t_B — время в очаге, определенное по s и p волнам. На рис. 3 представлены кривые, полученные путем усреднения данных всех 21 землетрясений. Землетрясения типа II обладают характерной зависимостью $z(t_0)$, имеющие плохое одностороннее окружение станциями. Тогда ясно, что изменение t_0 приводит к увеличению глубины очага при одновременном смещении его в сторону большинства станций. На рис. 4 приведены данные о станциях, зарегистрировавших землетрясе-

ния № 1508, 1509, 1510, которые отнесены к типу II, из них № 1510 (рис. 16) является типичным представителем этой группы. Из рис. 4 видно, что угловое окружение станциями для № 1508 составляет $\sim 135^\circ$, для 1510 — 150° и для № 1509 — 240° . Для сравнения на рис. 5 приведены аналогичные данные для землетрясений № 1503, 1504, 1505 — представителей группы I. Таким образом, можно сделать вывод, что глубина определяется неустойчиво при плохом окружении землетрясения станциями.

Для землетрясений типа I функционал (1) дает слабую зависимость глубины от t_0 в области $t_0 \approx t_B$ (см. рис. 1, а, 2, а), что позволяет говорить об устойчивости ее определения. Для функционала Φ_2 кривые $z(t_0)$ вновь монотонно растут с ростом t_0 . Следует отметить, что кривые $z(t_0)$ для землетрясений типа I пересекаются и, следовательно, использование различных функционалов дает приблизительно одинаковые глубины (± 5 км), что происходит примерно при $t_0 = t_B \pm (1 \div 1,5 \text{ с})$.

Еще одно сравнение результатов расчета глубины для функционалов Φ_1 и Φ_2 можно сделать, вычислив среднюю разницу глубин для всего массива землетрясений, она равна $\Delta z = z_1 - z_2 = 6$ км для одномерной модели среды и $\Delta z = 4$ км для блоковой модели. Отметим, что эти цифры станут несколько больше, если при усреднении данных мы ограничимся величинами глубины для каждого землетрясения, полученными при $t_0 = t_B$. Тогда $\Delta z = 7$ км для Φ_1 и $\Delta z = 5,5$ км для Φ_2 .

Различие результатов расчета глубины для различных землетрясений для одномерной и блоковой (трехмерной) модели видны из рис. 1, 2. При любом функционале блоковая среда дает всегда меньшее значение глубины (см. рис. 3). Средняя разница глубин для всех рассмотренных t_0 $\Delta z = z_{1DIM} - z_{3DIM} = 3$ км для функционала Φ_1 и $\Delta z = 2,5$ км для Φ_2 . Если эту же разницу оценить при $t_0 = t_B$, получаются числа $\Delta z = 4$ км для Φ_1 и $\Delta z = 3$ км для Φ_2 .

Таким образом, рассмотрев все полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Необходимым условием надежного определения координат гипоцентра землетрясения является хорошее окружение очага станциями.

2. Использование функционала, придающего больший вес ближайшим станциям типа Φ_1 , повышает устойчивость определения глубины.

3. Для землетрясений Кавказа, в качестве представителей которых были рассмотрены 21 землетрясение 1980 г., трехмерная блоковая модель дает меньшие разбросы в глубине очага при изменении t_0 и типа функционала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пивоварова Н.Б., Славина Л.Б. Опыт машинного определения координат землетрясений по данным региональной сети. — Наст. сб.
2. Николаев А.В. Сейсмика неоднородных и мутных сред. М.: Наука, 1972. 174 с.

АЛГОРИТМ И РЕЗУЛЬТАТЫ МАШИННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ РЕГИОНАЛЬНОЙ СЕТИ (на примере Кавказа)

Н.В. Пивоварова, Л.Б. Славина

Задача изучения скоростного строения отдельного региона включает в себя проблему определения координат очагов регистрируемых землетрясений.

В работе [1] рассмотрен итерационный алгоритм восстановления скоростного поля в фокальной зоне с одновременным уточнением параметров гипоцентров. На первом этапе для определения координат очагов используется достаточно простая модель среды, которая может быть построена по комплексным геофизическим данным и данным ГСЗ.

В данной работе рассматривается алгоритм и программа определения параметров гипоцентров землетрясений отдельного сейсмоактивного региона по сейсмологическим данным локальной сети сейсмостанций. Эта программа была подготовлена и опробована на материале сейсмических наблюдений региона Кавказа. Основная ее задача — получить однородные данные по координатам гипоцентров и глубинам очагов для дальнейшего использования их в построении трехмерного скоростного поля, исследовать сейсмический режим блокового строения среды.

Исходные данные для программы — времена первых вступлений P и S -волн на станциях. По этой информации модифицированным методом Вадати [2] вычисляется время в очаге. В дальнейшем координаты очага определяются только по временам первых вступлений P -волн, так как надежные данные о скоростях распространения S -волн отсутствуют. Время в очаге t_0 при этом фиксировано.

Координаты очага землетрясения определяются как точка минимума функционала $\Phi(x, y, z)$:

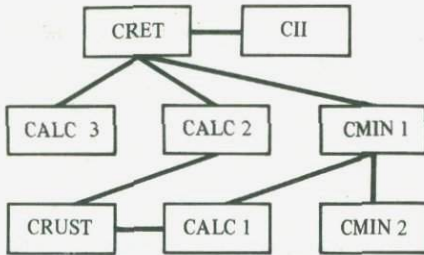
$$\Phi(x, y, z) = \sum a_k (\tau_k(x, y, z) + t_0 - t_k)^2,$$

где $\tau_k(x, y, z)$ — время пробега P -волны, вычисленное теоретически в соответствии с заданной скоростной моделью среды, t_0 — время начала землетрясения, t_k — время регистрации первого вступления P -волны на k -станции, a_k — веса отдельных станций.

При определении координат местных землетрясений использованы веса $a_k = w_k / \tau_k^2$, где w_k — надежность регистрации P -волны на k -станции. При таких весах функционал Φ — суммарная относительная невязка на станциях. Такой выбор весов отражает использование скоростной модели распространения P -волн, при этом ошибка в теоретически вычисленных временах τ_k пропорциональна эпицентральному расстоянию: $\delta\tau_k \sim \Delta_k \delta v \sim \tau_k \delta v$. Подробнее этот вопрос рассмотрен в работе [3].

Рассмотрим краткую структурную схему программы LOCENTR (рис. 1) — программы построения эпицентра землетрясения по данным локальной сети станций. Управляющая процедура CRET вводит исходные данные, организует процесс вычисления координат очага и печатает результаты. Расчет эпицентра проводится в декартовой системе координат, введенной так, что плоскость $Z = 0$ — дневная поверхность, поэтому все вычисляемые в дальнейшем глубины следует отсчитывать от дневной поверхности в данной точке области. Как показывают оценки [4], влияние сферичности

Р и с. 1. Краткая структурная схема программы LOCENTR

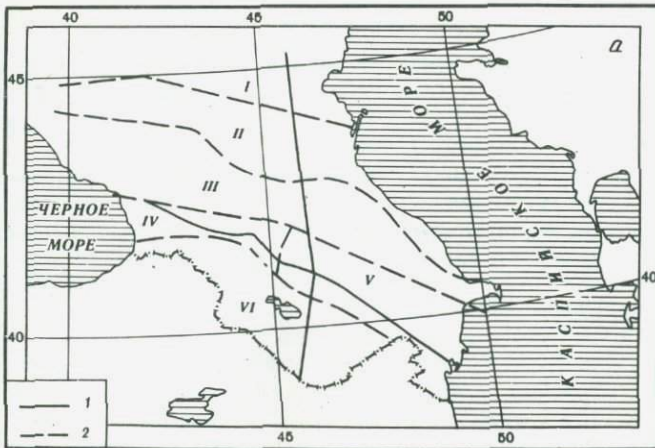


Земли становится существенным на удалениях свыше 500 км. Это ограничение на линейные размеры рассматриваемого региона не слишком жесткое, так как при определении координат дальним станциям будет придаваться меньше веса по сравнению с ближними.

Исходные параметры задачи, характеризующие регион, систему станций, скоростное строение и сами сейсмологические данные считаются в процедуре CRET с магнитного диска. В процедуре CRET предусмотрено двукратное обращение к CMIN1. После первого определения координат очага вычисляются и анализируются получающиеся невязки. Станции, для которых невязка превышает 7 с, выбрасываются из рассмотрения, после чего производится расчет координат очага. Это позволяет выделить и исключить станции, на которых имеются грубые ошибки снятия времен вступления или выделено не первое вступление P -волны.

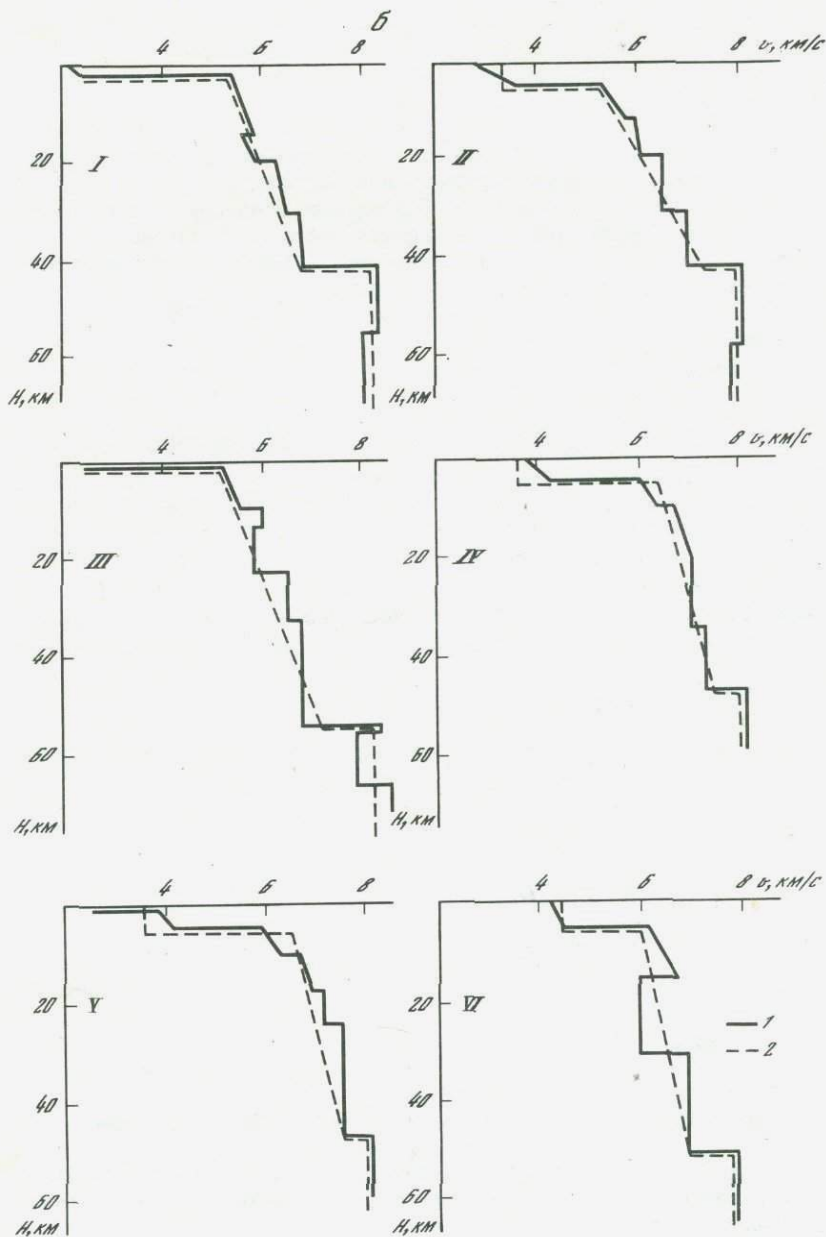
Программа CRUST вычисляет теоретическое время пробега в заданной скоростной модели. В ней используются два представления среды в регионе: а) блоковая модель среды; б) одномерный годограф.

В первом случае предполагается, что регион, можно разделить на K ($k \leq 6$) блоков, границы которых задаются в специальном массиве. В каждом блоке скоростная модель задается параметрами: толщина слоя



Р и с. 2. Карта-схема деления Кавказа на характерные скоростные блоки (а) и соответствующие им типовые скоростные модели земной коры (б)

а: 1 — профили ГСЗ, 2 — границы блоков; б: 1 — по данным ГСЗ, 2 — используемая при определении гипоцентров: I-VI — блоки



Р и с. 2 (окончание)

осадков и скорость в нем, толщина коры, скорость в верхах мантии, градиентная модель скорости в коре. Во втором случае среда может быть задана усредненным годографом для различных глубин (с шагом 10 км) при различных эпицентральных расстояниях.

Процедура С11 определяет номер блока, в котором находится заданная точка региона, если в задаче задано блоковое строение среды. Процедура СMIN1 проводит минимизацию функционала модифицированным методом Ньютона (метод Флетчера—Пауэлла). В процессе итераций поиск очередного приближения совмещен с уточнением обратной матрицы вторых производных функционала, что приводит к переходу от поиска одномерного минимума вдоль направления градиента функционала к поиску минимума вдоль направления, определяемого матрицей вторых производных в методе Ньютона. При вычислении точного одномерного минимума такой метод обеспечивает поиск минимума квадратичного функционала за n — итераций (где n — размерность задачи, в нашем случае $n = 3$) [5]. Поиск одномерных минимумов осуществляется путем последовательной аппроксимации значений функционала вдоль выбранного направления парабололами.

Опишем последовательность действий в процессе минимизации функционала $\Phi(\bar{p})$, где $\bar{p} = \{x, y, z\}$ — вектор искомым координат. Так как процесс итерационный, опишем переход от i -приближения к $i + 1$ -приближению. На i -шаге известны p_i , H_i -приближение обратной матрицы вторых производных функционала, $\bar{q}_i = \partial\Phi/\partial p_i$. Поиск $i + 1$ приближения будет происходить вдоль направления $\bar{p} = +H_i\bar{q}_i$. Шаг по этому направлению делается так, чтобы найти одномерный минимум функции Φ вдоль направления \bar{p}_i . Пусть

$$\min \Phi(\bar{p} + t\bar{p}_i) = \Phi(\bar{p} + t_i\bar{p}_i).$$

Точка $\bar{p}_{i+1} = \bar{p}_i + t_i\bar{p}_i$ — следующее приближение к решению. В этой точке переопределяются значения вектора \bar{q} и матрицы H :

$$\bar{q}_{i+1} = \frac{\partial\Phi}{\partial p} \Bigg|_{\bar{p} = \bar{p}_{i+1}} = \bar{y}_i \bar{q}_{i+1} - \bar{q}_i,$$

$$H_{i+1} = H_i + \frac{\beta(\bar{p}_i^T \bar{p}_i) - \bar{y}_i^T H_i \bar{p}_i - \bar{p}_i^T H_i \bar{y}_i}{(\bar{p}_i^T \bar{y}_i)}$$

$$\beta = t_i + \frac{\bar{y}_i^T H_i \bar{y}_i}{(\bar{p}_i^T \bar{y}_i)}.$$

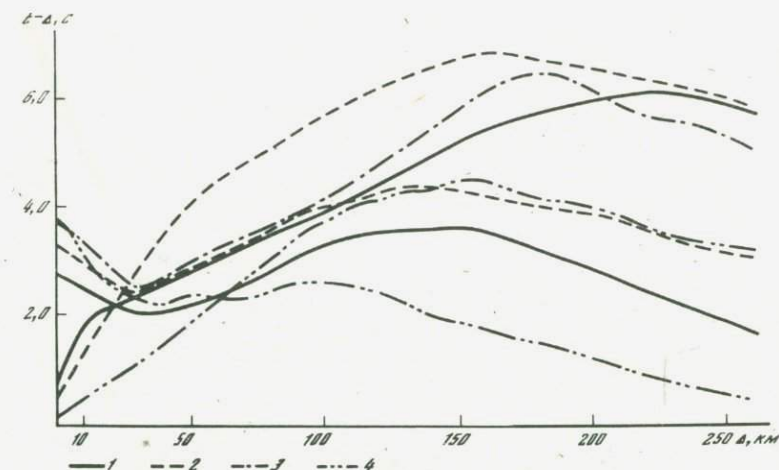
значок T — означает транспонирование.

Программа CALC1 вычисляет значения функционала и его градиента в заданной точке.

Программа CALC2 вычисляет дисперсии значений параметров гипоцентров. Они рассчитываются в предположении нормального закона плотности распределения флуктуации времен.

Программа CALC3 печатает результаты: параметры очага, стационарные данные, вычисленные эпицентральные расстояния и азимут на станцию невязки времен пробега.

По рассмотренному алгоритму и программам был проведен счет параметров гипоцентров для региона Кавказа. Геологические и геофизические исследования на Кавказе свидетельствуют о сложном строении среды этого региона. Поэтому он весь, согласно данным ГСЗ, был разделен на шесть



Р и с. 3. Сравнение редуцированных годографов

1 — скоростная модель 3DIM; 2 — 1DIM; 3 — модель Лебедевой—Левитской; 4 — модель Джеффриса

блоков, в каждом из которых была задана своя скоростная модель $v(z)$. На рис. 2, а, б приведены границы и номера блоков и соответствующие скоростные модели. По данным ГСЗ, скоростные модели представлены в виде многослойной среды. Для расчетов проведена аппроксимация модели в каждом блоке в виде трехслойной среды, где в верхней части и в осадках задавалась константа, в коре использовался линейный закон $v = v_0 + \beta z$, где β — градиент скорости, а в мантии v задавалась константой со скачком скорости на границе Мохо. Таким образом, в каждом блоке скоростная модель описывалась шестью параметрами. Рассмотренная блоковая модель Кавказа в дальнейшем называется 3DIM.

Параллельно с блоковой моделью расчеты проводились с использованием одномерной модели среды 1DIM.

На основании модели 3DIM рассчитаны площадные годографы первых вступлений P -волн. Для заданной глубины очага и данной станции рассчитывались прямая, головная и рефрагированная волны. В качестве первого вступления в площадном годографе выбиралась волна с наименьшим временем пробега вдоль луча. Если станция и очаг находились в разных блоках, то учитывались параметры обоих блоков. Например, при расчете головной волны по границе Мохо начальный отрезок луча рассчитывался по параметрам блока очага, конечный — по параметрам блока станции, а путь вдоль границы Мохо учитывал параметры обоих блоков. При расчетах других типов волн скоростное строение отдельных блоков учитывалось аналогичным образом. В табл. 1 распечатаны времена пробега P -волны в секундах для различных глубин очага H (0–40 км с шагом 10 км) и эпицентральных расстояний Δ — 10–300 км, при расположении станции и эпицентра как в одном, так и в разных блоках. Публикуемый площадной годограф может быть использован также при определении параметров очага вручную.

В табл. 2 приведен одномерный годограф, используемый в расчетах 1DIM. Этот годограф был получен путем усреднения годографов, рассчитанных нами с помощью программы А.Г. Епифанского [6] для различных

Таблица 1

Площадной годограф Р-волны Кавказа

| Δ, км | Времена пробега Р-волны в с, для станции I | | | | | | | | |
|-------|--|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|---------|
| | I-I | II-I | III-I | I-II | II-II | III-II | I-III | II-III | III-III |
| | <i>H = 0</i> | | | | | | | | |
| 10 | 3,4 | 3,8 | 3,0 | 3,8 | 4,3 | 3,5 | 3,0 | 3,5 | 2,7 |
| 20 | 5,3 | 5,7 | 4,9 | 5,7 | 6,1 | 5,4 | 4,9 | 5,4 | 4,6 |
| 30 | 7,2 | 7,6 | 6,8 | 7,6 | 8,0 | 7,3 | 6,8 | 7,3 | 6,5 |
| 40 | 9,1 | 9,5 | 8,8 | 9,5 | 9,9 | 9,2 | 8,8 | 9,2 | 8,4 |
| 50 | 11,0 | 11,4 | 10,7 | 11,4 | 11,8 | 11,1 | 10,7 | 11,1 | 10,4 |
| 60 | 12,3 | 13,3 | 12,6 | 13,3 | 13,7 | 13,0 | 12,6 | 13,0 | 12,3 |
| 70 | 14,7 | 15,2 | 14,5 | 15,2 | 15,6 | 14,9 | 14,5 | 14,9 | 14,2 |
| 80 | 16,6 | 17,0 | 16,4 | 17,0 | 17,5 | 16,8 | 16,4 | 16,8 | 16,1 |
| 90 | 18,5 | 18,9 | 18,3 | 18,9 | 19,2 | 18,7 | 18,3 | 18,7 | 18,0 |
| 100 | 20,4 | 20,8 | 20,2 | 20,8 | 20,7 | 20,5 | 20,2 | 20,5 | 20,0 |
| 110 | 22,3 | 22,6 | 22,1 | 22,6 | 22,1 | 22,0 | 22,1 | 22,0 | 21,8 |
| 120 | 24,2 | 24,1 | 24,0 | 24,1 | 23,6 | 23,6 | 24,0 | 23,6 | 23,5 |
| 130 | 26,1 | 25,6 | 25,7 | 25,6 | 25,1 | 25,2 | 25,7 | 25,2 | 25,2 |
| 140 | 27,8 | 27,2 | 27,3 | 27,2 | 26,5 | 26,7 | 27,3 | 26,7 | 26,9 |
| 150 | 29,4 | 28,7 | 28,9 | 28,7 | 28,0 | 28,3 | 28,9 | 28,3 | 28,5 |
| 160 | 31,0 | 30,2 | 30,5 | 30,2 | 29,4 | 29,8 | 30,5 | 29,8 | 30,1 |
| 170 | 32,1 | 31,4 | 32,1 | 31,4 | 30,8 | 31,3 | 32,1 | 31,3 | 31,7 |
| 180 | 33,3 | 32,6 | 33,7 | 32,6 | 32,0 | 32,8 | 33,7 | 32,8 | 33,3 |
| 190 | 34,4 | 33,8 | 34,9 | 33,8 | 33,2 | 34,2 | 34,9 | 34,2 | 34,9 |
| 200 | 35,6 | 35,0 | 36,0 | 35,0 | 34,4 | 35,5 | 36,0 | 35,5 | 36,4 |
| 210 | 36,7 | 36,1 | 37,2 | 36,1 | 35,6 | 36,7 | 37,2 | 36,7 | 37,7 |
| 220 | 37,9 | 37,3 | 38,4 | 37,3 | 36,8 | 37,9 | 38,4 | 37,9 | 38,9 |
| 230 | 39,1 | 38,5 | 39,6 | 38,5 | 38,0 | 39,1 | 39,6 | 39,1 | 40,1 |
| 240 | 40,3 | 39,7 | 40,8 | 39,7 | 39,2 | 40,3 | 40,8 | 40,3 | 41,3 |
| 250 | 41,4 | 40,9 | 42,0 | 40,9 | 40,5 | 41,5 | 42,0 | 41,5 | 42,5 |
| 260 | 42,6 | 42,2 | 43,2 | 42,2 | 41,7 | 42,7 | 43,2 | 42,7 | 43,7 |
| 270 | 43,8 | 43,4 | 44,4 | 43,4 | 42,9 | 43,9 | 44,4 | 43,9 | 44,9 |
| 280 | 45,0 | 44,6 | 45,6 | 44,6 | 44,1 | 45,2 | 45,6 | 45,2 | 46,1 |
| 290 | 46,2 | 45,8 | 46,8 | 45,8 | 45,2 | 46,4 | 46,8 | 46,4 | 47,3 |
| 300 | 47,4 | 47,0 | 48,0 | 47,0 | 46,2 | 47,6 | 48,0 | 47,6 | 48,6 |

| Δ, км | IV-I | V-I | VI-I | IV-II | V-II | VI-II | IV-III | V-III | VI-III |
|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|
| 10 | 3,6 | 3,6 | 3,3 | 4,1 | 4,1 | 3,7 | 3,2 | 3,2 | 2,9 |
| 20 | 5,3 | 5,3 | 5,0 | 5,8 | 5,7 | 5,5 | 4,9 | 4,9 | 4,7 |
| 30 | 7,0 | 6,9 | 6,8 | 7,5 | 7,4 | 7,3 | 6,6 | 6,6 | 6,4 |
| 40 | 8,7 | 8,6 | 8,6 | 9,2 | 9,1 | 9,0 | 8,4 | 8,3 | 8,2 |
| 50 | 10,4 | 10,3 | 10,3 | 10,9 | 10,8 | 10,8 | 10,1 | 10,0 | 10,0 |
| 60 | 12,1 | 12,0 | 12,1 | 12,6 | 12,5 | 12,6 | 11,8 | 11,7 | 11,8 |
| 70 | 13,8 | 13,7 | 13,9 | 14,3 | 14,1 | 14,3 | 13,5 | 13,4 | 13,6 |
| 80 | 15,6 | 15,3 | 15,7 | 16,0 | 15,8 | 16,1 | 15,3 | 15,0 | 15,4 |
| 90 | 17,3 | 17,0 | 17,4 | 17,7 | 17,5 | 17,9 | 17,0 | 16,7 | 17,2 |
| 100 | 19,0 | 18,7 | 19,2 | 19,4 | 19,2 | 19,6 | 18,7 | 18,4 | 18,9 |
| 110 | 20,7 | 20,4 | 21,0 | 21,2 | 20,9 | 21,4 | 20,4 | 20,1 | 20,7 |
| 120 | 22,4 | 22,1 | 22,7 | 22,9 | 22,5 | 23,0 | 22,2 | 21,8 | 22,5 |
| 130 | 24,1 | 23,7 | 24,5 | 24,6 | 24,2 | 24,5 | 23,9 | 23,5 | 24,3 |
| 140 | 25,8 | 25,4 | 26,3 | 26,3 | 25,7 | 26,0 | 25,6 | 25,2 | 26,0 |

и очага J, расположенных в разных блоках*

| I-IV | II-IV | III-IV | I-V | II-V | III-V | I-VI | II-VI | III-VI |
|--------------|-------|--------|------|------|-------|------|-------|--------|
| <i>H = 0</i> | | | | | | | | |
| 3,6 | 4,1 | 3,2 | 3,6 | 4,1 | 3,2 | 3,3 | 3,7 | 2,9 |
| 5,3 | 5,8 | 4,9 | 5,3 | 5,7 | 4,9 | 5,0 | 5,5 | 4,7 |
| 7,0 | 7,5 | 6,6 | 6,9 | 7,4 | 6,6 | 6,8 | 7,3 | 6,4 |
| 8,7 | 9,2 | 8,4 | 8,6 | 9,1 | 8,3 | 8,6 | 9,0 | 8,2 |
| 10,4 | 10,9 | 10,1 | 10,3 | 10,8 | 10,0 | 10,3 | 10,8 | 10,0 |
| 12,1 | 12,6 | 11,8 | 12,0 | 12,5 | 11,7 | 12,1 | 12,6 | 11,8 |
| 13,8 | 14,3 | 13,5 | 13,7 | 14,1 | 13,4 | 13,9 | 14,3 | 13,6 |
| 15,6 | 16,0 | 15,3 | 15,3 | 15,8 | 15,0 | 15,7 | 16,1 | 15,4 |
| 17,3 | 17,7 | 17,0 | 17,0 | 17,5 | 16,7 | 17,4 | 17,9 | 17,2 |
| 19,0 | 19,4 | 18,7 | 18,7 | 19,2 | 18,4 | 19,2 | 19,6 | 18,9 |
| 20,7 | 21,2 | 20,4 | 20,4 | 20,9 | 20,1 | 21,0 | 21,4 | 20,7 |
| 22,4 | 22,9 | 22,2 | 22,1 | 22,5 | 21,8 | 22,7 | 23,0 | 22,5 |
| 24,1 | 24,6 | 23,9 | 23,7 | 24,2 | 23,5 | 24,5 | 24,5 | 24,3 |
| 25,8 | 26,3 | 25,6 | 25,4 | 25,7 | 25,2 | 26,3 | 26,0 | 26,0 |
| 27,5 | 27,8 | 27,3 | 27,1 | 27,0 | 26,9 | 28,0 | 27,5 | 27,5 |
| 29,2 | 29,2 | 29,1 | 28,8 | 28,4 | 28,6 | 29,7 | 29,0 | 29,1 |
| 30,9 | 30,7 | 30,8 | 30,5 | 29,7 | 30,0 | 31,2 | 30,4 | 30,7 |
| 32,6 | 32,1 | 32,5 | 32,0 | 31,1 | 31,5 | 32,7 | 31,9 | 32,2 |
| 34,4 | 33,5 | 34,0 | 33,4 | 32,4 | 32,9 | 34,3 | 33,3 | 33,8 |
| 36,0 | 34,9 | 35,5 | 34,8 | 33,8 | 34,3 | 35,6 | 34,7 | 35,3 |
| 37,1 | 36,1 | 36,9 | 36,0 | 35,1 | 35,8 | 36,7 | 36,0 | 36,8 |
| 38,2 | 37,3 | 38,4 | 37,1 | 36,3 | 37,2 | 37,9 | 37,2 | 38,3 |
| 39,4 | 38,5 | 39,6 | 38,3 | 37,5 | 38,6 | 39,1 | 38,4 | 39,5 |
| 40,5 | 39,6 | 40,8 | 39,4 | 38,7 | 39,8 | 40,3 | 39,7 | 40,7 |
| 41,6 | 40,8 | 41,9 | 40,6 | 39,8 | 41,0 | 41,5 | 40,9 | 41,9 |
| 42,8 | 42,0 | 43,1 | 41,7 | 41,0 | 42,2 | 42,7 | 42,1 | 43,1 |
| 44,0 | 43,2 | 44,3 | 42,9 | 42,2 | 43,3 | 43,9 | 43,3 | 44,6 |
| 45,1 | 44,4 | 45,5 | 44,1 | 43,5 | 44,5 | 45,1 | 44,5 | 45,5 |
| 46,3 | 45,6 | 46,7 | 45,3 | 44,7 | 45,7 | 46,3 | 45,8 | 46,7 |
| 47,5 | 46,8 | 47,9 | 46,5 | 45,9 | 46,9 | 47,5 | 47,0 | 48,0 |

| IV-IV | V-IV | VI-IV | IV-V | V-V | VI-V | IV-VI | V-VI | VI-VI |
|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| 3,9 | 3,9 | 3,5 | 3,9 | 3,8 | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,2 |
| 5,4 | 5,4 | 5,2 | 5,4 | 5,4 | 5,1 | 5,2 | 5,1 | 4,9 |
| 7,0 | 6,9 | 6,8 | 6,9 | 6,9 | 6,7 | 6,8 | 6,7 | 6,5 |
| 8,5 | 8,5 | 8,4 | 8,5 | 8,4 | 8,3 | 8,4 | 8,3 | 8,2 |
| 10,1 | 10,0 | 10,0 | 10,0 | 9,9 | 9,9 | 10,0 | 9,9 | 9,9 |
| 11,7 | 11,5 | 11,6 | 11,5 | 11,4 | 11,5 | 11,6 | 11,5 | 11,5 |
| 13,2 | 13,1 | 13,2 | 13,1 | 12,9 | 13,1 | 13,2 | 13,1 | 13,2 |
| 14,8 | 14,6 | 14,8 | 14,6 | 14,4 | 14,7 | 14,8 | 14,7 | 14,9 |
| 16,4 | 16,2 | 16,4 | 16,2 | 16,0 | 16,2 | 16,4 | 16,2 | 16,5 |
| 17,9 | 17,7 | 18,1 | 17,7 | 17,5 | 17,8 | 18,1 | 17,8 | 18,2 |
| 19,5 | 19,2 | 19,7 | 19,2 | 19,0 | 19,4 | 19,7 | 19,4 | 19,9 |
| 21,0 | 20,8 | 21,3 | 20,8 | 20,5 | 21,0 | 21,3 | 21,0 | 21,5 |
| 22,6 | 22,3 | 22,9 | 22,3 | 22,0 | 22,6 | 22,9 | 22,6 | 23,2 |
| 24,2 | 23,9 | 24,5 | 23,9 | 23,5 | 24,2 | 24,5 | 24,2 | 24,9 |

* Первая цифра в колонках указывает номер блока, в котором расположена станция, вторая цифра — номер блока, где располагается гипоцентр землетрясения.

Таблица 1 (продолжение)

| Δ, км | IV-I | V-I | VI-I | IV-II | V-II | VI-II | IV-III | V-III | VI-III |
|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|
| 150 | 27,5 | 27,1 | 28,0 | 27,8 | 27,0 | 27,5 | 27,3 | 26,9 | 27,5 |
| 160 | 29,2 | 28,8 | 29,7 | 29,2 | 28,4 | 29,0 | 29,1 | 28,6 | 29,1 |
| 170 | 30,9 | 30,5 | 31,2 | 30,7 | 29,7 | 30,4 | 30,8 | 30,0 | 30,7 |
| 180 | 32,6 | 32,0 | 32,7 | 32,1 | 31,1 | 31,9 | 32,5 | 31,5 | 32,2 |
| 190 | 34,4 | 33,4 | 34,3 | 33,5 | 32,4 | 33,3 | 34,0 | 32,9 | 33,8 |
| 200 | 36,0 | 34,8 | 35,6 | 34,9 | 33,8 | 34,7 | 35,5 | 34,3 | 35,3 |
| 210 | 37,1 | 36,0 | 36,7 | 36,1 | 35,1 | 36,0 | 36,9 | 35,8 | 36,8 |
| 220 | 38,2 | 37,1 | 37,9 | 37,3 | 36,3 | 37,2 | 38,4 | 37,2 | 38,3 |
| 230 | 39,4 | 38,3 | 39,1 | 38,5 | 37,5 | 38,4 | 39,6 | 38,6 | 39,5 |
| 240 | 40,5 | 39,4 | 40,3 | 39,6 | 38,7 | 39,7 | 40,8 | 39,8 | 40,7 |
| 250 | 41,6 | 40,6 | 41,5 | 40,8 | 39,8 | 40,9 | 41,9 | 41,0 | 41,9 |
| 260 | 42,8 | 41,7 | 42,7 | 42,0 | 41,0 | 42,1 | 43,1 | 42,2 | 43,1 |
| 270 | 44,0 | 42,9 | 43,9 | 43,2 | 42,2 | 43,3 | 44,3 | 43,3 | 44,3 |
| 280 | 45,1 | 44,1 | 45,1 | 44,4 | 43,5 | 44,5 | 45,5 | 44,5 | 45,5 |
| 290 | 46,3 | 45,3 | 46,3 | 45,6 | 44,7 | 45,8 | 46,7 | 45,7 | 46,7 |
| 300 | 47,5 | 46,5 | 47,5 | 46,8 | 45,9 | 47,0 | 47,9 | 46,9 | 48,0 |

| Δ, км | I-I | II-I | III-I | I-II | II-II | III-II | I-III | II-III | III-III |
|--------------------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|---------|
| <i>H</i> = 10,0 км | | | | | | | | | |
| 10 | 3,2 | 3,3 | 2,9 | 3,2 | 3,3 | 2,9 | 3,3 | 3,4 | 2,9 |
| 20 | 5,0 | 5,2 | 4,6 | 5,0 | 5,1 | 4,5 | 5,1 | 5,2 | 4,6 |
| 30 | 6,9 | 7,1 | 6,4 | 6,8 | 6,9 | 6,3 | 7,0 | 7,1 | 6,4 |
| 40 | 8,8 | 8,9 | 8,2 | 8,6 | 8,7 | 8,1 | 8,9 | 8,9 | 8,2 |
| 50 | 10,6 | 10,7 | 10,0 | 10,4 | 10,4 | 9,8 | 10,7 | 10,7 | 10,0 |
| 60 | 12,4 | 12,4 | 11,8 | 12,1 | 12,1 | 11,6 | 12,5 | 12,4 | 11,8 |
| 70 | 14,2 | 14,1 | 13,5 | 13,8 | 13,7 | 13,3 | 14,2 | 14,1 | 13,6 |
| 80 | 15,9 | 15,7 | 15,3 | 15,5 | 15,4 | 15,0 | 15,9 | 15,8 | 15,3 |
| 90 | 17,6 | 17,4 | 17,0 | 17,1 | 16,9 | 16,7 | 17,6 | 17,4 | 17,1 |
| 100 | 19,3 | 19,0 | 18,7 | 18,8 | 18,5 | 18,3 | 19,3 | 19,0 | 18,8 |
| 110 | 20,9 | 20,6 | 20,4 | 20,4 | 20,1 | 20,0 | 21,0 | 20,7 | 20,5 |
| 120 | 22,6 | 22,2 | 22,1 | 22,0 | 21,6 | 21,6 | 22,7 | 22,2 | 22,2 |
| 130 | 24,2 | 23,7 | 23,8 | 23,5 | 23,1 | 23,2 | 24,3 | 23,8 | 23,9 |
| 140 | 25,9 | 25,3 | 25,4 | 25,1 | 24,5 | 24,7 | 25,9 | 25,4 | 25,5 |
| 150 | 27,4 | 26,8 | 27,1 | 26,6 | 26,0 | 26,3 | 27,6 | 26,9 | 27,2 |
| 160 | 28,5 | 28,0 | 28,7 | 27,9 | 27,3 | 27,8 | 29,2 | 28,4 | 28,8 |
| 170 | 29,7 | 29,2 | 30,2 | 29,1 | 28,6 | 29,3 | 30,6 | 29,8 | 30,4 |
| 180 | 30,9 | 30,4 | 31,4 | 30,3 | 29,8 | 30,7 | 31,8 | 31,3 | 31,9 |
| 190 | 32,1 | 31,6 | 32,6 | 31,5 | 31,0 | 32,1 | 33,0 | 32,5 | 33,5 |
| 200 | 33,3 | 32,8 | 33,8 | 32,7 | 32,3 | 33,3 | 34,2 | 33,7 | 34,7 |
| 210 | 34,5 | 34,1 | 35,0 | 34,0 | 33,5 | 34,5 | 35,4 | 34,9 | 35,9 |
| 220 | 35,7 | 35,3 | 36,2 | 35,2 | 34,7 | 35,7 | 36,6 | 36,1 | 36,1 |
| 230 | 36,9 | 36,5 | 37,5 | 36,4 | 36,0 | 37,0 | 37,8 | 37,4 | 38,4 |
| 240 | 38,1 | 37,7 | 38,7 | 37,6 | 37,2 | 38,2 | 39,0 | 38,6 | 39,6 |
| 250 | 39,3 | 38,9 | 39,9 | 38,8 | 38,4 | 39,4 | 40,2 | 39,5 | 40,8 |
| 260 | 40,5 | 40,2 | 41,1 | 40,1 | 39,7 | 40,6 | 41,4 | 41,0 | 42,0 |
| 270 | 41,7 | 41,4 | 42,3 | 41,3 | 40,9 | 41,9 | 42,6 | 42,2 | 43,2 |
| 280 | 42,9 | 42,6 | 43,5 | 42,5 | 42,0 | 43,1 | 43,8 | 43,5 | 44,4 |
| 290 | 44,1 | 43,8 | 44,7 | 43,7 | 43,0 | 44,3 | 45,0 | 44,7 | 45,6 |
| 300 | 45,4 | 45,1 | 45,9 | 45,0 | 44,0 | 45,6 | 46,2 | 45,9 | 46,8 |

| IV-IV | V-IV | VI-IV | IV-V | V-V | VI-V | IV-VI | V-VI | VI-VI |
|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| 25,7 | 25,4 | 26,1 | 25,4 | 25,1 | 25,8 | 26,1 | 25,8 | 26,5 |
| 27,3 | 26,9 | 27,7 | 26,9 | 26,6 | 27,4 | 27,7 | 27,4 | 28,2 |
| 28,9 | 28,5 | 29,4 | 28,5 | 28,1 | 28,9 | 29,4 | 28,9 | 29,9 |
| 30,4 | 30,0 | 31,0 | 30,0 | 29,6 | 30,5 | 31,0 | 30,5 | 31,4 |
| 32,0 | 31,5 | 32,6 | 31,5 | 31,1 | 32,1 | 32,6 | 32,1 | 32,9 |
| 33,5 | 33,1 | 34,2 | 33,1 | 32,6 | 33,7 | 34,2 | 33,7 | 34,4 |
| 35,1 | 34,6 | 35,8 | 34,6 | 34,1 | 35,2 | 35,8 | 35,2 | 35,9 |
| 36,7 | 36,2 | 37,4 | 36,2 | 35,7 | 36,6 | 37,4 | 36,6 | 37,4 |
| 38,2 | 37,7 | 39,0 | 37,7 | 37,2 | 37,9 | 39,0 | 37,9 | 38,8 |
| 39,8 | 39,2 | 40,6 | 39,2 | 38,5 | 39,3 | 40,6 | 39,3 | 40,3 |
| 41,4 | 40,8 | 42,0 | 40,8 | 39,7 | 40,7 | 42,0 | 40,7 | 41,5 |
| 42,9 | 42,3 | 43,1 | 42,3 | 41,0 | 41,9 | 43,1 | 41,9 | 42,7 |
| 44,5 | 44,6 | 44,3 | 43,6 | 42,3 | 43,1 | 44,3 | 43,1 | 43,9 |
| 46,0 | 44,8 | 45,5 | 44,8 | 43,4 | 44,2 | 45,5 | 44,2 | 45,1 |
| 47,6 | 45,9 | 46,6 | 45,9 | 44,6 | 45,4 | 46,6 | 45,4 | 46,3 |
| 48,7 | 47,0 | 47,8 | 47,0 | 45,7 | 46,6 | 47,8 | 46,6 | 47,5 |

| I-IV | II-IV | III-IV | I-V | II-V | III-V | I-VI | II-VI | III-VI |
|--------------------|-------|--------|------|------|-------|------|-------|--------|
| <i>H</i> = 10,0 км | | | | | | | | |
| 3,0 | 3,1 | 2,7 | 3,0 | 3,1 | 2,6 | 3,1 | 3,2 | 2,8 |
| 4,7 | 4,9 | 4,2 | 4,6 | 4,8 | 4,1 | 4,8 | 5,0 | 4,3 |
| 6,6 | 6,7 | 5,9 | 6,4 | 6,6 | 5,8 | 6,7 | 6,8 | 6,1 |
| 8,4 | 8,5 | 7,6 | 8,2 | 8,3 | 7,5 | 8,5 | 8,6 | 7,8 |
| 10,1 | 10,2 | 9,3 | 9,9 | 9,9 | 9,1 | 10,3 | 10,3 | 9,5 |
| 11,8 | 11,8 | 11,0 | 11,5 | 11,5 | 10,0 | 12,0 | 12,0 | 11,3 |
| 13,6 | 13,4 | 12,7 | 13,1 | 13,0 | 12,3 | 13,7 | 13,6 | 12,9 |
| 15,1 | 15,0 | 14,3 | 14,7 | 14,6 | 13,9 | 15,3 | 15,2 | 14,6 |
| 16,7 | 16,5 | 15,9 | 16,2 | 16,1 | 15,5 | 17,0 | 16,8 | 16,3 |
| 18,3 | 18,0 | 17,5 | 17,8 | 17,5 | 17,1 | 18,6 | 18,3 | 17,9 |
| 19,9 | 19,6 | 19,2 | 19,3 | 19,0 | 18,6 | 20,2 | 19,9 | 19,6 |
| 21,5 | 21,1 | 20,8 | 20,8 | 20,5 | 20,2 | 21,8 | 21,4 | 21,2 |
| 23,0 | 22,6 | 22,3 | 22,3 | 21,9 | 21,7 | 23,4 | 23,0 | 22,8 |
| 24,6 | 24,1 | 23,9 | 23,8 | 23,4 | 23,3 | 25,0 | 24,5 | 24,5 |
| 26,1 | 25,6 | 25,5 | 25,3 | 24,8 | 24,8 | 26,6 | 26,0 | 26,1 |
| 27,7 | 27,0 | 27,1 | 26,8 | 26,2 | 26,3 | 28,1 | 27,5 | 27,6 |
| 29,2 | 28,5 | 28,7 | 28,3 | 27,6 | 27,8 | 29,7 | 28,9 | 29,2 |
| 30,7 | 29,9 | 30,2 | 29,8 | 29,0 | 29,3 | 31,2 | 30,4 | 30,8 |
| 32,2 | 31,4 | 31,7 | 31,2 | 30,4 | 30,8 | 32,5 | 31,8 | 32,3 |
| 33,4 | 32,8 | 33,3 | 32,5 | 31,7 | 32,2 | 33,7 | 33,2 | 33,9 |
| 34,5 | 34,0 | 34,8 | 33,7 | 33,1 | 33,7 | 35,0 | 34,4 | 35,4 |
| 35,7 | 35,2 | 36,1 | 34,9 | 34,3 | 35,1 | 36,2 | 35,6 | 36,6 |
| 36,9 | 36,4 | 37,3 | 36,1 | 35,6 | 36,5 | 37,4 | 36,9 | 37,8 |
| 38,1 | 37,6 | 38,5 | 37,3 | 36,8 | 37,7 | 38,6 | 38,1 | 39,0 |
| 39,3 | 38,8 | 39,7 | 38,5 | 38,0 | 39,0 | 39,8 | 39,3 | 40,1 |
| 40,5 | 40,1 | 41,0 | 39,7 | 39,2 | 40,2 | 41,0 | 40,6 | 41,3 |
| 41,7 | 41,3 | 42,2 | 40,9 | 40,5 | 41,4 | 42,2 | 41,8 | 42,7 |
| 42,9 | 42,5 | 43,4 | 42,1 | 41,7 | 42,6 | 43,4 | 43,0 | 43,9 |
| 44,2 | 43,7 | 44,6 | 43,3 | 42,9 | 43,8 | 44,7 | 44,3 | 45,2 |
| 45,4 | 45,0 | 45,8 | 44,5 | 44,1 | 45,1 | 45,9 | 45,5 | 44,4 |

Таблица 1 (продолжение)

| Δ, км | IV-I | V-I | VI-I | V-II | IV-II | VI-II | IV-III | V-III | VI-III |
|-------|------|------|------|------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 10 | 3,2 | 3,2 | 2,9 | 3,2 | 3,2 | 2,8 | 3,2 | 3,2 | 2,9 |
| 20 | 5,0 | 5,0 | 4,5 | 4,9 | 4,9 | 4,4 | 5,0 | 5,0 | 4,5 |
| 30 | 6,9 | 6,8 | 6,2 | 6,8 | 6,7 | 6,2 | 6,9 | 6,8 | 6,3 |
| 40 | 8,8 | 8,6 | 8,0 | 8,6 | 8,4 | 7,9 | 8,8 | 8,7 | 8,0 |
| 50 | 10,6 | 10,4 | 9,7 | 10,3 | 10,1 | 9,6 | 10,6 | 10,4 | 9,8 |
| 60 | 12,3 | 12,0 | 11,5 | 11,9 | 11,7 | 11,2 | 12,3 | 12,0 | 11,5 |
| 70 | 14,0 | 13,6 | 13,1 | 13,5 | 13,2 | 12,9 | 14,0 | 13,6 | 13,2 |
| 80 | 15,6 | 15,2 | 14,8 | 15,1 | 14,7 | 14,5 | 15,6 | 15,2 | 14,9 |
| 90 | 17,2 | 16,7 | 16,5 | 16,6 | 16,2 | 16,1 | 17,2 | 16,7 | 16,5 |
| 100 | 18,8 | 18,2 | 18,1 | 18,1 | 17,7 | 17,7 | 18,8 | 18,3 | 18,2 |
| 110 | 20,3 | 19,7 | 19,7 | 19,2 | 19,2 | 19,3 | 20,3 | 19,8 | 19,8 |
| 120 | 21,9 | 21,3 | 21,3 | 21,2 | 20,6 | 20,8 | 21,9 | 21,3 | 21,4 |
| 130 | 23,4 | 22,7 | 23,0 | 22,7 | 22,1 | 22,4 | 23,5 | 22,8 | 23,0 |
| 140 | 25,0 | 24,2 | 24,6 | 24,2 | 23,5 | 23,9 | 25,0 | 24,3 | 24,6 |
| 150 | 26,5 | 25,7 | 26,1 | 25,6 | 24,9 | 25,4 | 26,5 | 25,8 | 26,2 |
| 160 | 28,0 | 27,2 | 27,7 | 27,1 | 26,3 | 26,9 | 28,1 | 27,2 | 27,8 |
| 170 | 29,6 | 28,7 | 29,3 | 28,6 | 27,7 | 28,4 | 29,6 | 28,7 | 29,4 |
| 180 | 30,9 | 29,9 | 30,7 | 30,0 | 29,1 | 29,9 | 31,1 | 30,2 | 30,9 |
| 190 | 32,1 | 31,1 | 31,9 | 31,2 | 30,3 | 31,3 | 32,6 | 31,6 | 32,5 |
| 200 | 33,3 | 32,3 | 33,1 | 32,4 | 31,5 | 32,5 | 34,1 | 33,0 | 34,0 |
| 210 | 34,4 | 33,5 | 34,3 | 33,7 | 32,7 | 33,7 | 35,3 | 34,3 | 35,2 |
| 220 | 35,6 | 34,7 | 35,6 | 34,9 | 34,0 | 35,0 | 36,5 | 35,5 | 36,4 |
| 230 | 36,8 | 35,9 | 36,8 | 36,1 | 35,2 | 36,2 | 37,6 | 37,6 | 37,6 |
| 240 | 38,0 | 37,1 | 38,0 | 37,3 | 36,4 | 37,4 | 38,8 | 37,9 | 38,9 |
| 250 | 39,2 | 38,3 | 39,2 | 38,5 | 37,6 | 38,7 | 40,0 | 39,1 | 40,1 |
| 260 | 40,4 | 39,5 | 40,4 | 39,7 | 38,8 | 39,9 | 41,2 | 40,3 | 41,3 |
| 270 | 41,6 | 40,7 | 41,7 | 41,0 | 40,1 | 41,2 | 42,4 | 41,5 | 42,5 |
| 280 | 42,8 | 41,9 | 42,9 | 42,2 | 41,3 | 42,4 | 43,6 | 42,7 | 43,7 |
| 290 | 44,0 | 43,1 | 44,1 | 43,4 | 42,5 | 43,7 | 44,8 | 43,9 | 45,0 |
| 300 | 45,2 | 44,3 | 45,3 | 44,6 | 43,7 | 44,9 | 46,0 | 45,2 | 46,2 |

| Δ, км | I-I | II-I | III-I | I-II | II-II | III-II | I-III | II-III | III-III |
|-------|--------------------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|---------|
| | <i>H</i> = 20,0 км | | | | | | | | |
| 10 | 4,5 | 4,5 | 4,2 | 4,4 | 4,5 | 4,2 | 4,5 | 4,6 | 4,3 |
| 20 | 5,6 | 5,7 | 5,3 | 5,6 | 5,6 | 5,3 | 5,7 | 5,7 | 5,4 |
| 30 | 7,1 | 7,2 | 6,8 | 7,0 | 7,0 | 6,7 | 7,2 | 7,2 | 6,8 |
| 40 | 8,8 | 8,8 | 8,4 | 8,6 | 8,6 | 8,2 | 8,8 | 8,8 | 8,4 |
| 50 | 10,4 | 10,4 | 10,0 | 10,2 | 10,2 | 9,8 | 10,5 | 10,4 | 10,0 |
| 60 | 12,1 | 12,0 | 11,7 | 11,8 | 11,7 | 11,4 | 12,2 | 12,1 | 11,7 |
| 70 | 13,8 | 13,7 | 13,3 | 13,5 | 13,3 | 13,0 | 13,9 | 13,7 | 13,4 |
| 80 | 15,5 | 15,3 | 15,0 | 15,1 | 14,9 | 14,7 | 15,5 | 15,3 | 15,1 |
| 90 | 17,1 | 16,9 | 16,7 | 16,7 | 16,4 | 16,3 | 17,2 | 16,9 | 16,8 |
| 100 | 18,8 | 18,4 | 18,3 | 18,3 | 17,9 | 17,9 | 18,8 | 18,5 | 18,4 |
| 110 | 20,4 | 20,0 | 20,0 | 19,8 | 19,4 | 19,4 | 20,5 | 20,0 | 20,1 |
| 120 | 22,0 | 21,5 | 21,6 | 21,4 | 20,9 | 21,0 | 22,1 | 21,6 | 21,7 |
| 130 | 23,6 | 23,1 | 23,2 | 22,9 | 22,3 | 22,5 | 23,7 | 23,1 | 23,3 |
| 140 | 24,9 | 24,3 | 24,8 | 24,3 | 23,7 | 24,0 | 25,3 | 24,6 | 24,9 |
| 150 | 26,1 | 25,6 | 26,4 | 25,6 | 25,0 | 25,5 | 26,9 | 26,1 | 26,5 |

| | IV-IV | V-IV | III-IV | IV-V | V-V | VI-V | IV-VI | V-VI | VI-VI |
|--|-------|------|--------|------|------|------|-------|------|-------|
| | 3,0 | 3,0 | 2,7 | 3,0 | 3,0 | 2,6 | 3,1 | 3,1 | 2,7 |
| | 4,8 | 4,7 | 4,2 | 4,7 | 4,6 | 4,1 | 4,8 | 4,8 | 4,3 |
| | 6,6 | 6,6 | 5,9 | 6,5 | 6,4 | 5,8 | 6,7 | 6,6 | 6,0 |
| | 8,5 | 8,4 | 7,6 | 8,3 | 8,2 | 7,4 | 8,6 | 8,5 | 7,7 |
| | 10,3 | 10,1 | 9,2 | 10,0 | 9,8 | 9,0 | 10,4 | 10,2 | 9,4 |
| | 12,1 | 11,8 | 10,9 | 11,7 | 11,4 | 10,6 | 12,1 | 11,8 | 11,1 |
| | 13,7 | 13,3 | 12,5 | 13,2 | 12,9 | 12,1 | 13,8 | 13,4 | 12,7 |
| | 15,4 | 14,9 | 14,1 | 14,8 | 14,4 | 13,7 | 15,4 | 14,9 | 14,3 |
| | 16,9 | 16,4 | 15,6 | 16,3 | 15,8 | 15,2 | 16,9 | 16,4 | 15,9 |
| | 18,5 | 17,8 | 17,2 | 17,7 | 17,2 | 16,7 | 18,5 | 17,9 | 17,5 |
| | 20,0 | 19,3 | 18,7 | 19,2 | 18,6 | 18,2 | 20,0 | 19,4 | 19,0 |
| | 21,4 | 20,7 | 20,3 | 20,6 | 20,0 | 19,7 | 21,5 | 20,8 | 20,6 |
| | 22,9 | 22,1 | 21,8 | 22,0 | 21,3 | 21,2 | 23,0 | 22,2 | 22,2 |
| | 24,4 | 23,5 | 23,3 | 23,4 | 22,7 | 22,6 | 24,5 | 23,7 | 23,7 |
| | 25,8 | 24,9 | 24,8 | 24,8 | 24,1 | 24,1 | 25,9 | 25,1 | 25,3 |
| | 27,3 | 26,3 | 26,3 | 26,2 | 25,4 | 25,6 | 27,4 | 26,5 | 26,8 |
| | 28,7 | 27,7 | 27,8 | 27,6 | 26,8 | 27,0 | 28,9 | 28,0 | 28,3 |
| | 30,2 | 29,1 | 29,4 | 29,0 | 28,1 | 28,5 | 30,4 | 29,4 | 29,9 |
| | 31,6 | 30,5 | 30,9 | 30,4 | 29,5 | 29,9 | 31,8 | 30,8 | 31,4 |
| | 33,1 | 31,9 | 32,4 | 31,8 | 30,9 | 31,4 | 33,3 | 32,2 | 32,9 |
| | 34,5 | 33,3 | 33,9 | 33,2 | 32,8 | 32,8 | 34,8 | 33,6 | 34,4 |
| | 35,9 | 34,7 | 35,3 | 34,6 | 33,5 | 34,2 | 36,2 | 35,0 | 35,9 |
| | 37,4 | 36,1 | 36,8 | 36,0 | 34,9 | 37,5 | 37,5 | 36,4 | 37,2 |
| | 38,6 | 37,3 | 38,0 | 37,4 | 36,2 | 37,1 | 38,7 | 37,6 | 38,4 |
| | 39,7 | 38,5 | 39,2 | 38,6 | 37,5 | 38,3 | 39,9 | 38,8 | 39,6 |
| | 40,9 | 39,7 | 40,4 | 39,8 | 38,7 | 39,5 | 41,1 | 40,0 | 40,9 |
| | 42,1 | 40,9 | 41,7 | 41,0 | 39,9 | 40,8 | 42,3 | 41,2 | 42,1 |
| | 43,3 | 42,1 | 42,9 | 42,2 | 41,1 | 42,0 | 43,5 | 42,4 | 43,8 |
| | 44,5 | 43,3 | 44,1 | 43,4 | 42,3 | 43,2 | 44,7 | 43,6 | 44,6 |
| | 45,7 | 44,5 | 45,3 | 44,6 | 43,5 | 44,5 | 45,9 | 44,9 | 45,8 |

| | I-IV | II-IV | III-VI | I-V | II-V | III-V | I-VI | II-VI | III-VI |
|--|--------------------|-------|--------|------|------|-------|------|-------|--------|
| | <i>H</i> = 20,0 км | | | | | | | | |
| | 4,2 | 4,2 | 3,9 | 4,1 | 4,2 | 3,9 | 4,3 | 4,3 | 4,9 |
| | 5,3 | 5,3 | 5,0 | 5,2 | 5,2 | 4,9 | 5,4 | 5,5 | 5,1 |
| | 6,7 | 6,7 | 6,3 | 6,5 | 6,6 | 6,2 | 6,8 | 6,9 | 6,5 |
| | 8,2 | 8,3 | 7,8 | 8,1 | 8,1 | 7,6 | 8,4 | 8,4 | 8,0 |
| | 9,8 | 9,8 | 9,4 | 9,6 | 9,6 | 9,1 | 10,0 | 10,0 | 9,6 |
| | 11,5 | 11,4 | 10,9 | 11,2 | 11,1 | 10,7 | 11,7 | 11,6 | 11,2 |
| | 13,1 | 13,0 | 12,5 | 12,7 | 12,6 | 12,2 | 13,3 | 13,2 | 12,8 |
| | 14,7 | 14,5 | 14,1 | 14,3 | 14,1 | 13,7 | 14,9 | 14,8 | 14,4 |
| | 16,3 | 16,0 | 15,7 | 15,8 | 15,6 | 15,3 | 16,6 | 16,3 | 16,0 |
| | 17,9 | 17,6 | 17,3 | 17,3 | 17,1 | 16,8 | 18,2 | 17,9 | 17,6 |
| | 19,4 | 19,1 | 18,9 | 18,8 | 18,5 | 18,3 | 19,8 | 19,4 | 19,2 |
| | 21,0 | 20,6 | 20,4 | 20,4 | 20,8 | 19,8 | 21,3 | 20,9 | 20,8 |
| | 22,5 | 22,0 | 22,0 | 21,8 | 21,4 | 21,3 | 22,9 | 22,4 | 22,4 |
| | 24,1 | 23,5 | 23,5 | 23,3 | 22,8 | 22,8 | 24,5 | 23,9 | 24,0 |
| | 25,6 | 25,0 | 25,1 | 24,8 | 24,2 | 24,3 | 26,0 | 25,3 | 25,6 |

Таблица 1 (продолжение)

| Δ, км | I-I | II-I | III-I | I-II | II-II | III-II | I-III | II-III | III-III |
|-------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|---------|
| 160 | 27,3 | 26,8 | 27,8 | 26,8 | 26,2 | 27,0 | 28,1 | 27,5 | 28,1 |
| 170 | 28,5 | 28,0 | 29,0 | 28,0 | 27,5 | 28,4 | 29,3 | 28,8 | 29,6 |
| 180 | 29,7 | 29,2 | 30,2 | 29,2 | 28,7 | 29,7 | 30,5 | 30,0 | 31,0 |
| 190 | 30,9 | 30,4 | 31,4 | 30,4 | 29,9 | 31,0 | 31,7 | 31,2 | 32,3 |
| 200 | 32,1 | 31,6 | 32,6 | 31,6 | 31,2 | 32,2 | 32,9 | 32,5 | 33,5 |
| 210 | 33,3 | 32,8 | 33,8 | 32,9 | 32,4 | 33,4 | 34,1 | 33,7 | 34,7 |
| 220 | 34,5 | 34,1 | 35,0 | 34,1 | 33,7 | 34,6 | 35,3 | 34,9 | 35,9 |
| 230 | 35,7 | 35,3 | 36,2 | 35,3 | 34,9 | 35,9 | 36,5 | 36,1 | 37,1 |
| 240 | 36,9 | 36,5 | 37,4 | 36,5 | 36,1 | 37,1 | 37,7 | 37,3 | 38,3 |
| 250 | 38,1 | 37,7 | 38,7 | 37,8 | 37,4 | 38,3 | 39,0 | 38,6 | 39,5 |
| 260 | 39,3 | 39,0 | 39,9 | 39,0 | 38,6 | 39,6 | 40,2 | 39,8 | 40,8 |
| 270 | 40,5 | 40,2 | 41,1 | 40,2 | 39,7 | 40,8 | 41,4 | 41,0 | 42,0 |
| 280 | 41,7 | 41,4 | 42,3 | 41,4 | 40,7 | 42,0 | 42,6 | 42,2 | 43,2 |
| 290 | 42,9 | 42,6 | 43,5 | 42,7 | 41,7 | 43,3 | 43,8 | 43,5 | 44,4 |
| 300 | 44,1 | 43,9 | 44,7 | 43,9 | 42,7 | 44,5 | 45,0 | 44,7 | 45,6 |

| Δ, км | IV-I | V-I | VI-I | IV-II | V-II | VI-II | IV-III | V-III | VI-III |
|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|
| 10 | 4,3 | 4,3 | 4,1 | 4,3 | 4,2 | 4,0 | 4,4 | 4,3 | 4,1 |
| 20 | 5,5 | 5,4 | 5,2 | 5,4 | 5,3 | 5,1 | 5,5 | 5,4 | 5,2 |
| 30 | 6,9 | 6,8 | 6,6 | 6,8 | 6,7 | 6,5 | 7,0 | 6,8 | 6,6 |
| 40 | 8,5 | 8,3 | 8,1 | 8,3 | 8,2 | 8,0 | 8,5 | 8,4 | 8,1 |
| 50 | 10,1 | 9,9 | 9,7 | 9,9 | 9,7 | 9,5 | 10,2 | 10,0 | 9,7 |
| 60 | 11,8 | 11,5 | 11,3 | 11,5 | 11,2 | 11,1 | 11,8 | 11,5 | 11,4 |
| 70 | 13,4 | 13,1 | 12,9 | 13,0 | 12,8 | 12,6 | 13,4 | 13,1 | 13,0 |
| 80 | 15,0 | 14,6 | 14,5 | 14,6 | 14,2 | 14,2 | 15,1 | 14,7 | 14,6 |
| 90 | 16,6 | 16,2 | 16,2 | 16,1 | 15,7 | 15,7 | 16,7 | 16,2 | 16,2 |
| 100 | 18,2 | 17,7 | 17,8 | 17,6 | 17,2 | 17,3 | 18,2 | 17,7 | 17,8 |
| 110 | 19,8 | 19,2 | 19,4 | 19,1 | 18,6 | 18,8 | 19,8 | 19,3 | 19,4 |
| 120 | 21,3 | 20,7 | 20,9 | 20,6 | 20,1 | 20,4 | 21,4 | 20,8 | 21,0 |
| 130 | 22,9 | 22,2 | 22,5 | 22,1 | 21,5 | 21,9 | 22,9 | 22,2 | 22,6 |
| 140 | 24,4 | 23,7 | 24,1 | 23,6 | 22,9 | 23,4 | 24,5 | 23,7 | 24,2 |
| 150 | 26,0 | 25,0 | 25,7 | 25,0 | 24,3 | 24,8 | 26,0 | 25,2 | 25,7 |
| 160 | 27,2 | 26,2 | 27,0 | 26,5 | 25,6 | 26,3 | 27,5 | 26,6 | 27,3 |
| 170 | 28,3 | 27,4 | 28,2 | 27,7 | 26,8 | 27,7 | 29,0 | 28,1 | 28,8 |
| 180 | 29,5 | 28,6 | 29,4 | 28,9 | 28,0 | 28,9 | 30,4 | 29,5 | 30,3 |
| 190 | 30,7 | 29,8 | 30,7 | 30,1 | 29,2 | 30,2 | 31,6 | 30,6 | 31,5 |
| 200 | 31,9 | 31,0 | 31,9 | 31,3 | 30,4 | 31,4 | 32,8 | 31,8 | 32,7 |
| 210 | 33,1 | 32,2 | 33,1 | 32,5 | 31,6 | 32,6 | 33,9 | 33,0 | 33,9 |
| 220 | 34,3 | 33,4 | 34,3 | 33,8 | 32,9 | 33,9 | 35,1 | 34,2 | 35,2 |
| 230 | 35,5 | 34,6 | 35,6 | 35,0 | 34,1 | 35,1 | 36,3 | 35,4 | 36,4 |
| 240 | 36,7 | 35,8 | 36,8 | 36,2 | 35,3 | 35,4 | 37,6 | 36,7 | 37,6 |
| 250 | 37,9 | 37,0 | 38,0 | 37,4 | 36,5 | 37,6 | 38,8 | 37,9 | 38,8 |
| 260 | 39,1 | 38,2 | 39,2 | 38,6 | 37,8 | 38,9 | 40,0 | 39,1 | 40,1 |
| 270 | 40,3 | 39,4 | 40,5 | 39,9 | 39,0 | 40,1 | 41,2 | 40,3 | 41,3 |
| 280 | 41,5 | 40,6 | 41,7 | 41,1 | 40,2 | 41,3 | 42,4 | 41,5 | 42,5 |
| 290 | 42,7 | 41,8 | 42,9 | 42,3 | 41,4 | 42,6 | 43,6 | 42,7 | 43,7 |
| 300 | 44,0 | 43,1 | 44,1 | 43,6 | 42,7 | 43,8 | 44,8 | 43,9 | 45,0 |

| | I-IV | II-IV | III-IV | I-V | II-V | III-V | I-VI | II-VI | III-VI |
|--|------|-------|--------|------|------|-------|------|-------|--------|
| | 27,2 | 26,4 | 26,6 | 26,3 | 25,6 | 25,8 | 27,6 | 26,8 | 27,1 |
| | 28,7 | 27,8 | 28,2 | 27,7 | 26,9 | 27,3 | 29,1 | 28,2 | 28,6 |
| | 30,0 | 29,3 | 29,7 | 29,2 | 28,3 | 28,7 | 30,3 | 29,6 | 30,2 |
| | 31,2 | 30,6 | 31,2 | 30,5 | 29,6 | 30,2 | 31,5 | 30,9 | 31,7 |
| | 32,4 | 31,8 | 32,7 | 31,7 | 31,0 | 31,6 | 32,7 | 32,2 | 33,1 |
| | 33,6 | 33,1 | 34,0 | 32,9 | 32,3 | 33,0 | 33,9 | 33,4 | 34,3 |
| | 34,8 | 34,3 | 35,2 | 34,1 | 33,6 | 34,4 | 35,1 | 34,6 | 35,6 |
| | 36,0 | 35,5 | 36,4 | 35,3 | 34,8 | 35,8 | 36,3 | 35,9 | 36,8 |
| | 37,2 | 36,7 | 37,6 | 36,5 | 36,0 | 37,0 | 37,6 | 37,1 | 38,0 |
| | 38,4 | 37,9 | 38,8 | 37,7 | 37,3 | 38,2 | 38,8 | 38,3 | 39,3 |
| | 39,6 | 39,2 | 40,1 | 38,9 | 38,5 | 39,4 | 40,0 | 39,6 | 40,5 |
| | 40,8 | 40,4 | 41,3 | 40,1 | 39,7 | 40,6 | 41,2 | 40,8 | 41,7 |
| | 42,0 | 41,6 | 42,5 | 41,3 | 40,9 | 41,9 | 42,4 | 42,0 | 42,9 |
| | 43,2 | 42,9 | 43,7 | 42,6 | 42,1 | 43,1 | 43,7 | 43,3 | 44,2 |
| | 44,5 | 44,1 | 44,9 | 43,8 | 43,3 | 44,3 | 44,9 | 44,5 | 45,4 |

| | IV-IV | V-IV | VI-IV | IV-V | V-V | VI-V | IV-VI | V-VI | VI-VI |
|--|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| | 4,1 | 4,0 | 3,8 | 4,0 | 4,0 | 3,8 | 4,2 | 4,1 | 3,9 |
| | 5,2 | 5,1 | 4,9 | 5,1 | 5,0 | 4,7 | 5,3 | 5,2 | 5,0 |
| | 6,6 | 6,5 | 6,2 | 6,4 | 6,3 | 6,0 | 6,7 | 6,6 | 6,3 |
| | 8,1 | 8,0 | 7,6 | 7,9 | 7,8 | 7,4 | 8,2 | 8,1 | 7,8 |
| | 9,7 | 9,5 | 9,1 | 9,4 | 9,3 | 8,9 | 9,8 | 9,6 | 9,3 |
| | 11,3 | 11,0 | 10,7 | 11,0 | 10,8 | 10,4 | 11,4 | 11,2 | 10,9 |
| | 12,9 | 12,6 | 12,2 | 12,5 | 12,2 | 11,9 | 13,0 | 12,7 | 12,5 |
| | 14,5 | 14,1 | 13,8 | 14,0 | 13,7 | 13,4 | 14,6 | 14,3 | 14,0 |
| | 16,0 | 15,6 | 15,3 | 15,5 | 15,2 | 14,9 | 16,2 | 15,8 | 15,6 |
| | 17,6 | 17,1 | 16,9 | 17,0 | 16,6 | 16,4 | 17,8 | 17,3 | 17,2 |
| | 19,1 | 18,6 | 18,4 | 18,5 | 18,0 | 17,9 | 19,3 | 18,8 | 18,7 |
| | 20,7 | 20,0 | 19,9 | 20,0 | 19,4 | 19,3 | 20,8 | 20,2 | 20,3 |
| | 22,2 | 21,5 | 21,4 | 21,4 | 20,8 | 20,8 | 22,4 | 21,7 | 21,8 |
| | 23,7 | 22,9 | 22,9 | 22,8 | 22,2 | 22,3 | 23,9 | 23,1 | 23,3 |
| | 25,2 | 24,3 | 24,5 | 24,3 | 23,5 | 23,7 | 25,4 | 24,6 | 24,9 |
| | 26,6 | 25,8 | 26,0 | 25,7 | 24,9 | 25,2 | 26,9 | 26,0 | 26,4 |
| | 28,1 | 27,2 | 27,5 | 27,1 | 26,3 | 26,6 | 28,3 | 27,4 | 27,9 |
| | 29,6 | 28,6 | 29,0 | 28,5 | 27,6 | 28,0 | 29,8 | 28,9 | 29,4 |
| | 31,0 | 30,0 | 30,5 | 29,9 | 29,0 | 29,5 | 31,3 | 30,3 | 30,9 |
| | 32,5 | 31,4 | 31,9 | 31,3 | 30,3 | 30,9 | 32,7 | 31,7 | 32,4 |
| | 33,9 | 32,7 | 33,4 | 32,7 | 31,7 | 32,3 | 33,9 | 32,9 | 33,7 |
| | 35,1 | 33,9 | 34,6 | 34,1 | 33,0 | 33,7 | 35,2 | 34,1 | 34,9 |
| | 36,2 | 35,1 | 35,8 | 35,3 | 34,3 | 35,1 | 36,4 | 35,3 | 36,2 |
| | 37,4 | 36,3 | 37,1 | 36,5 | 35,5 | 36,3 | 37,6 | 36,5 | 37,4 |
| | 38,6 | 37,5 | 38,3 | 37,7 | 36,7 | 37,6 | 38,8 | 37,7 | 38,6 |
| | 39,8 | 38,7 | 39,5 | 38,9 | 37,9 | 38,8 | 40,0 | 39,0 | 39,9 |
| | 41,0 | 39,9 | 40,7 | 40,1 | 39,1 | 40,0 | 41,2 | 40,2 | 41,1 |
| | 42,3 | 41,1 | 42,0 | 41,3 | 40,3 | 41,2 | 42,4 | 41,4 | 42,3 |
| | 43,5 | 42,3 | 43,2 | 42,5 | 41,5 | 42,5 | 43,6 | 42,6 | 43,6 |
| | 44,7 | 43,6 | 44,4 | 43,7 | 42,7 | 43,7 | 44,8 | 43,8 | 44,8 |

Таблица 1 (продолжение)

| Δ, км | I-I | II-I | III-I | I-II | II-II | III-II | I-III | II-III | III-III |
|--------------------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|---------|
| <i>H = 30,0 км</i> | | | | | | | | | |
| 10 | 5,9 | 5,9 | 5,7 | 5,8 | 5,8 | 5,6 | 6,0 | 5,9 | 5,7 |
| 20 | 6,8 | 6,7 | 6,5 | 6,6 | 6,6 | 6,3 | 6,8 | 6,7 | 6,5 |
| 30 | 7,9 | 7,9 | 7,6 | 7,7 | 7,7 | 7,4 | 7,9 | 7,9 | 7,7 |
| 40 | 9,3 | 9,2 | 9,0 | 9,0 | 9,0 | 8,7 | 9,3 | 9,2 | 9,0 |
| 50 | 10,7 | 10,6 | 10,4 | 10,5 | 10,4 | 10,1 | 10,8 | 10,7 | 10,4 |
| 60 | 12,3 | 12,1 | 11,9 | 11,9 | 11,8 | 11,6 | 12,3 | 12,1 | 12,0 |
| 70 | 13,8 | 13,6 | 13,5 | 13,4 | 13,2 | 13,1 | 13,9 | 13,6 | 13,5 |
| 80 | 15,4 | 15,1 | 15,0 | 15,0 | 14,7 | 14,6 | 15,5 | 15,2 | 15,1 |
| 90 | 17,0 | 16,6 | 16,6 | 16,5 | 16,1 | 16,1 | 17,0 | 16,7 | 16,7 |
| 100 | 18,6 | 18,1 | 18,2 | 18,0 | 17,6 | 17,6 | 18,6 | 18,2 | 18,2 |
| 110 | 20,1 | 19,6 | 19,7 | 19,5 | 19,0 | 19,1 | 20,2 | 19,7 | 19,8 |
| 120 | 21,3 | 20,8 | 21,3 | 20,9 | 20,4 | 20,6 | 21,8 | 21,1 | 21,4 |
| 130 | 22,5 | 22,0 | 22,9 | 22,2 | 21,7 | 22,1 | 23,3 | 22,6 | 22,9 |
| 140 | 23,7 | 23,2 | 24,2 | 23,4 | 22,9 | 23,5 | 24,6 | 24,0 | 24,5 |
| 150 | 24,9 | 24,5 | 25,4 | 24,6 | 24,1 | 24,9 | 25,8 | 25,3 | 26,0 |
| 160 | 26,1 | 25,7 | 26,7 | 25,9 | 25,4 | 26,3 | 27,0 | 26,5 | 27,5 |
| 170 | 27,3 | 26,9 | 27,9 | 27,1 | 26,6 | 27,6 | 28,2 | 27,7 | 28,7 |
| 180 | 28,6 | 28,1 | 29,1 | 28,3 | 27,9 | 28,9 | 29,4 | 28,9 | 30,0 |
| 190 | 29,8 | 29,3 | 30,3 | 29,5 | 29,1 | 30,1 | 30,6 | 30,2 | 31,2 |
| 200 | 31,0 | 30,5 | 31,5 | 30,8 | 30,3 | 31,3 | 31,8 | 31,4 | 32,4 |
| 210 | 32,2 | 31,8 | 32,7 | 32,0 | 31,6 | 32,6 | 33,0 | 32,6 | 33,6 |
| 220 | 33,4 | 33,0 | 33,9 | 33,2 | 32,8 | 33,8 | 34,2 | 33,8 | 34,8 |
| 230 | 34,6 | 34,2 | 35,2 | 34,4 | 34,0 | 35,0 | 35,4 | 35,1 | 36,0 |
| 240 | 35,8 | 35,4 | 36,4 | 35,7 | 35,3 | 36,2 | 36,7 | 36,3 | 37,2 |
| 250 | 37,0 | 36,7 | 37,6 | 36,9 | 36,5 | 37,5 | 37,9 | 37,5 | 38,5 |
| 260 | 38,2 | 37,9 | 38,8 | 38,1 | 37,5 | 38,7 | 39,1 | 38,7 | 39,7 |
| 270 | 39,4 | 39,1 | 40,0 | 39,3 | 38,6 | 39,9 | 40,3 | 40,0 | 40,9 |
| 280 | 40,6 | 40,3 | 41,2 | 40,6 | 39,6 | 41,2 | 41,5 | 41,2 | 42,1 |
| 290 | 41,8 | 41,6 | 42,4 | 41,8 | 40,6 | 42,4 | 42,7 | 42,4 | 43,3 |
| 300 | 43,1 | 42,8 | 43,7 | 43,0 | 41,6 | 43,6 | 43,9 | 43,6 | 44,5 |

| Δ, км | IV-I | V-I | VI-I | IV-II | V-II | VI-II | IV-III | V-III | VI-III |
|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|
| 10 | 5,7 | 5,6 | 5,5 | 5,6 | 5,5 | 5,4 | 5,8 | 5,6 | 5,6 |
| 20 | 6,5 | 6,4 | 6,3 | 6,4 | 6,3 | 6,2 | 6,5 | 6,4 | 6,3 |
| 30 | 7,6 | 7,5 | 7,4 | 7,5 | 7,3 | 7,2 | 7,7 | 7,5 | 7,4 |
| 40 | 9,0 | 8,8 | 8,7 | 8,8 | 8,6 | 8,5 | 9,0 | 8,8 | 8,7 |
| 50 | 10,4 | 10,2 | 10,1 | 10,1 | 9,9 | 9,8 | 10,4 | 10,2 | 10,1 |
| 60 | 11,9 | 11,6 | 11,6 | 11,6 | 11,3 | 11,3 | 11,9 | 11,6 | 11,6 |
| 70 | 13,4 | 13,1 | 13,1 | 13,0 | 12,7 | 12,7 | 13,4 | 13,1 | 13,1 |
| 80 | 14,9 | 14,5 | 14,6 | 14,5 | 14,1 | 14,2 | 15,0 | 14,6 | 14,6 |
| 90 | 16,5 | 16,0 | 16,1 | 16,0 | 15,5 | 15,7 | 16,5 | 16,0 | 16,2 |
| 100 | 18,0 | 17,5 | 17,7 | 17,4 | 16,9 | 17,1 | 18,0 | 17,5 | 17,7 |
| 110 | 19,5 | 19,0 | 19,2 | 18,9 | 18,3 | 18,6 | 19,6 | 19,0 | 19,3 |
| 120 | 21,1 | 20,2 | 20,7 | 20,3 | 19,7 | 20,1 | 21,1 | 20,5 | 20,8 |
| 130 | 22,3 | 21,4 | 22,2 | 21,8 | 21,0 | 21,5 | 22,6 | 21,9 | 22,3 |
| 140 | 23,5 | 22,6 | 23,5 | 23,1 | 22,2 | 23,0 | 24,1 | 23,3 | 23,8 |
| 150 | 24,7 | 23,8 | 24,7 | 24,3 | 23,4 | 24,3 | 25,6 | 24,7 | 25,4 |

| | I-IV | II-IV | III-IV | I-V | II-V | III-V | I-VI | II-VI | III-VI |
|--------------------|------|-------|--------|------|------|-------|------|-------|--------|
| <i>H = 30,0 км</i> | | | | | | | | | |
| | 5,6 | 5,6 | 5,3 | 5,4 | 5,4 | 5,2 | 5,7 | 5,7 | 5,5 |
| | 6,4 | 6,3 | 6,1 | 6,2 | 6,2 | 5,9 | 6,5 | 6,5 | 6,2 |
| | 7,5 | 7,4 | 7,2 | 7,3 | 7,2 | 7,0 | 7,6 | 7,6 | 7,3 |
| | 8,8 | 8,7 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,2 | 8,9 | 8,9 | 8,6 |
| | 10,2 | 10,1 | 9,8 | 9,9 | 9,8 | 9,5 | 10,4 | 10,3 | 10,0 |
| | 11,6 | 11,5 | 11,2 | 11,3 | 11,2 | 10,8 | 11,9 | 11,7 | 11,5 |
| | 13,1 | 13,0 | 12,7 | 12,8 | 12,6 | 12,3 | 13,4 | 13,2 | 13,0 |
| | 14,7 | 14,4 | 14,2 | 14,2 | 14,0 | 13,8 | 14,9 | 14,7 | 14,5 |
| | 16,2 | 15,9 | 15,7 | 15,7 | 15,4 | 15,3 | 16,5 | 16,1 | 16,0 |
| | 17,7 | 17,3 | 17,2 | 17,2 | 16,8 | 16,7 | 18,0 | 17,6 | 17,6 |
| | 19,2 | 18,8 | 18,8 | 18,6 | 18,2 | 18,2 | 19,5 | 19,1 | 19,1 |
| | 20,8 | 20,3 | 20,3 | 20,1 | 19,6 | 19,6 | 21,1 | 20,5 | 20,6 |
| | 22,3 | 21,7 | 21,8 | 21,6 | 21,0 | 21,1 | 22,6 | 22,0 | 22,2 |
| | 23,8 | 23,1 | 23,3 | 23,0 | 22,4 | 22,6 | 24,1 | 23,4 | 23,7 |
| | 25,3 | 24,5 | 24,8 | 24,4 | 23,7 | 24,0 | 25,6 | 24,8 | 25,2 |
| | 26,6 | 26,0 | 26,3 | 25,9 | 25,1 | 25,4 | 26,9 | 26,3 | 26,7 |
| | 27,8 | 27,3 | 27,8 | 27,3 | 26,4 | 26,9 | 28,1 | 27,6 | 28,2 |
| | 29,0 | 28,5 | 29,3 | 28,5 | 27,7 | 28,3 | 29,3 | 28,8 | 29,7 |
| | 30,3 | 29,8 | 30,7 | 29,8 | 29,0 | 29,7 | 30,5 | 30,0 | 31,0 |
| | 31,5 | 31,0 | 31,9 | 31,0 | 30,3 | 31,1 | 31,7 | 31,3 | 32,2 |
| | 32,7 | 32,2 | 33,1 | 32,2 | 31,6 | 32,5 | 33,0 | 32,5 | 33,4 |
| | 33,9 | 33,4 | 34,3 | 33,4 | 32,9 | 33,8 | 34,2 | 33,7 | 34,7 |
| | 35,1 | 34,7 | 35,5 | 34,6 | 34,1 | 35,1 | 35,4 | 35,0 | 35,9 |
| | 36,3 | 35,9 | 36,8 | 35,8 | 35,3 | 36,3 | 36,6 | 36,2 | 37,1 |
| | 37,5 | 37,1 | 38,0 | 37,0 | 36,6 | 37,5 | 37,8 | 37,4 | 38,3 |
| | 38,7 | 38,3 | 39,2 | 38,2 | 37,8 | 38,8 | 39,1 | 38,7 | 39,6 |
| | 40,0 | 39,6 | 40,4 | 39,5 | 38,9 | 40,0 | 40,3 | 39,9 | 40,8 |
| | 41,2 | 40,8 | 41,6 | 40,7 | 40,1 | 41,2 | 41,5 | 41,2 | 42,0 |
| | 42,4 | 42,0 | 42,9 | 41,9 | 41,2 | 42,4 | 42,7 | 42,4 | 43,3 |
| | 43,6 | 43,3 | 44,1 | 43,1 | 42,4 | 43,6 | 44,0 | 43,6 | 44,5 |

| | IV-IV | V-IV | VI-IV | IV-V | V-V | VI-V | IV-VI | V-VI | VI-VI |
|--|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| | 5,4 | 5,3 | 5,2 | 5,3 | 5,2 | 5,1 | 5,5 | 5,4 | 5,3 |
| | 6,2 | 6,1 | 5,9 | 6,0 | 5,9 | 5,8 | 6,3 | 6,2 | 6,1 |
| | 7,3 | 7,1 | 7,0 | 7,1 | 6,9 | 6,8 | 7,4 | 7,2 | 7,1 |
| | 8,5 | 8,4 | 8,2 | 8,3 | 8,2 | 8,0 | 8,7 | 8,5 | 8,4 |
| | 9,9 | 9,7 | 9,5 | 9,7 | 9,5 | 9,3 | 10,1 | 9,8 | 9,7 |
| | 11,4 | 11,1 | 10,9 | 11,0 | 10,8 | 10,7 | 11,5 | 11,3 | 11,2 |
| | 12,8 | 12,5 | 12,4 | 12,5 | 12,2 | 12,0 | 13,0 | 12,7 | 12,6 |
| | 14,3 | 14,0 | 13,9 | 13,9 | 13,6 | 13,5 | 14,5 | 14,2 | 14,1 |
| | 15,8 | 15,4 | 15,3 | 15,4 | 15,0 | 14,9 | 16,0 | 15,6 | 15,6 |
| | 17,3 | 16,9 | 16,8 | 16,8 | 16,4 | 16,3 | 17,6 | 17,1 | 17,1 |
| | 18,8 | 18,3 | 18,3 | 18,2 | 17,7 | 17,8 | 19,1 | 18,5 | 18,6 |
| | 20,3 | 19,7 | 19,8 | 19,7 | 19,1 | 19,2 | 20,6 | 20,0 | 20,1 |
| | 21,8 | 21,2 | 21,3 | 21,1 | 20,5 | 20,6 | 22,1 | 21,4 | 21,6 |
| | 23,3 | 22,6 | 22,8 | 22,5 | 21,9 | 22,1 | 23,6 | 22,8 | 23,1 |
| | 24,8 | 24,0 | 24,3 | 23,9 | 23,2 | 23,5 | 25,0 | 24,2 | 24,6 |

Таблица 1 (продолжение)

| Δ, км | IV-I | V-I | VI-I | IV-II | V-II | VI-II | IV-III | V-III | VI-III |
|-------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|
| 160 | 25,9 | 25,1 | 25,9 | 25,5 | 24,6 | 25,6 | 26,8 | 25,9 | 26,7 |
| 170 | 27,2 | 26,3 | 27,1 | 26,7 | 25,9 | 26,8 | 28,0 | 27,1 | 28,0 |
| 180 | 28,4 | 27,5 | 28,4 | 28,0 | 27,1 | 28,1 | 29,2 | 28,3 | 29,2 |
| 190 | 29,6 | 28,7 | 29,6 | 29,2 | 28,3 | 29,3 | 30,4 | 29,5 | 30,4 |
| 200 | 30,8 | 29,9 | 30,8 | 30,4 | 29,5 | 30,6 | 31,6 | 30,7 | 31,6 |
| 210 | 32,0 | 31,1 | 32,0 | 31,6 | 30,7 | 31,8 | 32,8 | 31,9 | 32,9 |
| 220 | 33,2 | 32,3 | 33,3 | 32,9 | 32,0 | 33,0 | 34,0 | 33,1 | 34,1 |
| 230 | 34,4 | 33,5 | 34,5 | 34,1 | 33,2 | 34,3 | 35,2 | 34,3 | 35,3 |
| 240 | 35,6 | 34,7 | 35,7 | 35,3 | 34,4 | 35,5 | 36,4 | 35,5 | 36,5 |
| 250 | 36,8 | 35,9 | 36,9 | 36,5 | 35,7 | 36,8 | 37,6 | 36,8 | 37,8 |
| 260 | 38,0 | 37,1 | 38,2 | 37,8 | 36,9 | 38,0 | 38,8 | 38,0 | 39,0 |
| 270 | 39,2 | 38,3 | 39,4 | 39,0 | 38,1 | 39,3 | 40,1 | 39,2 | 40,2 |
| 280 | 40,4 | 39,6 | 40,6 | 40,2 | 39,3 | 40,5 | 41,3 | 40,4 | 41,4 |
| 290 | 41,7 | 40,8 | 41,8 | 41,5 | 40,6 | 41,7 | 42,5 | 41,6 | 42,7 |
| 300 | 42,9 | 42,0 | 43,1 | 42,7 | 41,8 | 43,0 | 43,7 | 42,8 | 43,9 |

| Δ, км | I-I | II-I | III-I | I-II | II-II | III-II | I-III | II-III | III-III |
|-------|------------------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|---------|
| | <i>H = 40 км</i> | | | | | | | | |
| 10 | 7,4 | 7,3 | 7,2 | 7,2 | 7,1 | 7,0 | 7,4 | 7,3 | 7,2 |
| 20 | 8,0 | 7,9 | 7,8 | 7,8 | 7,7 | 7,5 | 8,0 | 7,9 | 7,8 |
| 30 | 8,9 | 8,8 | 8,7 | 8,7 | 8,5 | 8,4 | 8,9 | 8,8 | 8,7 |
| 40 | 10,1 | 9,9 | 9,8 | 9,8 | 9,6 | 9,5 | 10,1 | 9,9 | 9,8 |
| 50 | 11,3 | 11,1 | 11,0 | 11,0 | 10,8 | 10,7 | 11,4 | 11,2 | 11,1 |
| 60 | 12,7 | 12,4 | 12,4 | 12,3 | 12,1 | 12,0 | 12,7 | 12,5 | 12,4 |
| 70 | 14,1 | 13,6 | 13,8 | 13,7 | 13,4 | 13,3 | 14,2 | 13,8 | 13,8 |
| 80 | 15,4 | 14,9 | 15,2 | 15,1 | 14,7 | 14,7 | 15,6 | 15,2 | 15,3 |
| 90 | 16,6 | 16,1 | 16,7 | 16,9 | 16,0 | 16,1 | 17,1 | 16,6 | 16,7 |
| 100 | 17,9 | 17,4 | 18,2 | 17,8 | 17,3 | 17,5 | 18,6 | 18,1 | 18,2 |
| 110 | 19,1 | 18,6 | 19,6 | 19,1 | 18,5 | 18,9 | 20,0 | 19,4 | 19,7 |
| 120 | 20,3 | 19,8 | 20,8 | 20,3 | 19,8 | 20,3 | 21,2 | 20,7 | 21,2 |
| 130 | 21,5 | 21,0 | 22,1 | 21,5 | 21,0 | 21,7 | 22,4 | 21,9 | 22,7 |
| 140 | 22,7 | 22,3 | 23,3 | 22,7 | 22,3 | 23,1 | 23,6 | 23,1 | 24,2 |
| 150 | 24,0 | 23,5 | 24,5 | 24,0 | 23,5 | 24,5 | 24,8 | 24,3 | 25,4 |
| 160 | 25,2 | 24,7 | 25,7 | 25,2 | 24,7 | 25,8 | 26,0 | 25,6 | 26,6 |
| 170 | 26,4 | 25,9 | 26,9 | 26,4 | 26,0 | 27,0 | 27,2 | 26,8 | 27,8 |
| 180 | 27,6 | 27,2 | 28,1 | 27,6 | 27,2 | 28,2 | 28,4 | 28,0 | 29,0 |
| 190 | 28,8 | 28,4 | 29,4 | 28,9 | 28,5 | 29,4 | 29,7 | 29,2 | 30,2 |
| 200 | 30,0 | 29,6 | 30,6 | 30,1 | 29,7 | 30,7 | 30,9 | 30,5 | 31,4 |
| 210 | 31,2 | 30,8 | 31,8 | 31,3 | 30,9 | 31,9 | 32,1 | 31,7 | 32,7 |
| 220 | 32,4 | 32,1 | 33,0 | 32,6 | 32,2 | 33,1 | 33,3 | 32,9 | 33,9 |
| 230 | 33,6 | 33,3 | 34,2 | 33,8 | 33,4 | 34,4 | 34,5 | 34,1 | 35,1 |
| 240 | 34,8 | 34,5 | 35,4 | 35,0 | 34,5 | 35,6 | 35,7 | 35,4 | 36,3 |
| 250 | 36,1 | 35,7 | 36,6 | 36,2 | 35,6 | 36,8 | 36,9 | 36,6 | 37,5 |
| 260 | 37,3 | 37,0 | 37,9 | 37,5 | 36,6 | 38,1 | 38,1 | 37,8 | 38,7 |
| 270 | 38,5 | 38,2 | 39,1 | 38,7 | 37,6 | 39,3 | 39,3 | 39,0 | 40,0 |
| 280 | 39,7 | 39,4 | 40,3 | 39,9 | 38,6 | 40,5 | 40,6 | 40,3 | 41,2 |
| 290 | 40,7 | 40,7 | 41,5 | 41,1 | 39,6 | 41,7 | 41,8 | 41,5 | 42,4 |
| 300 | 42,1 | 41,9 | 42,7 | 42,4 | 40,6 | 42,8 | 43,0 | 42,7 | 43,6 |

| | IV-IV | V-IV | VI-IV | IV-V | V-V | VI-V | IV-VI | V-VI | VI-VI |
|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| 26,3 | 25,4 | 25,7 | 25,3 | 24,6 | 24,9 | 26,5 | 25,7 | 26,1 | |
| 27,7 | 26,8 | 27,2 | 26,8 | 25,9 | 26,3 | 28,0 | 27,0 | 27,6 | |
| 29,1 | 28,1 | 28,7 | 28,2 | 27,2 | 27,7 | 29,2 | 28,2 | 29,0 | |
| 30,4 | 29,3 | 30,0 | 29,5 | 28,6 | 29,1 | 30,5 | 29,5 | 30,3 | |
| 31,6 | 30,5 | 31,3 | 30,9 | 29,9 | 30,5 | 31,7 | 30,7 | 31,5 | |
| 32,8 | 31,7 | 32,5 | 32,1 | 31,1 | 31,9 | 32,9 | 31,9 | 32,8 | |
| 34,0 | 33,0 | 33,7 | 33,3 | 32,4 | 33,2 | 34,1 | 33,1 | 34,0 | |
| 35,2 | 34,2 | 35,0 | 34,5 | 33,6 | 34,4 | 35,3 | 34,3 | 35,2 | |
| 36,4 | 35,4 | 36,2 | 35,8 | 34,8 | 35,7 | 36,6 | 35,6 | 36,5 | |
| 37,7 | 36,6 | 37,4 | 37,0 | 36,0 | 36,9 | 37,8 | 36,8 | 37,7 | |
| 38,9 | 37,8 | 38,7 | 38,2 | 37,2 | 38,1 | 39,0 | 38,0 | 39,0 | |
| 40,1 | 39,0 | 39,9 | 39,4 | 38,4 | 39,4 | 40,2 | 39,2 | 40,2 | |
| 41,3 | 40,2 | 41,1 | 40,6 | 39,6 | 40,6 | 41,4 | 40,4 | 41,4 | |
| 42,5 | 41,4 | 42,4 | 41,8 | 40,8 | 41,8 | 42,7 | 41,7 | 42,7 | |
| 43,7 | 42,7 | 43,6 | 43,0 | 42,1 | 43,1 | 43,9 | 42,9 | 43,9 | |

| | I-IV | II-IV | III-IV | I-V | II-V | III-V | I-VI | II-VI | III-VI |
|------|------------------|-------|--------|------|------|-------|------|-------|--------|
| | <i>H = 40 км</i> | | | | | | | | |
| 7,0 | 6,9 | 6,8 | 6,8 | 6,7 | 6,6 | 7,1 | 7,0 | 6,9 | |
| 7,6 | 7,5 | 7,3 | 7,4 | 7,3 | 7,1 | 7,7 | 7,6 | 7,5 | |
| 8,5 | 8,4 | 8,2 | 8,2 | 8,1 | 8,0 | 8,6 | 8,5 | 8,3 | |
| 9,6 | 9,4 | 9,3 | 9,3 | 9,2 | 9,0 | 9,7 | 9,6 | 9,4 | |
| 10,8 | 10,6 | 10,5 | 10,5 | 10,3 | 10,1 | 11,0 | 10,8 | 10,6 | |
| 12,1 | 11,9 | 11,8 | 11,7 | 11,5 | 11,4 | 12,3 | 12,1 | 12,0 | |
| 13,5 | 13,2 | 13,1 | 13,1 | 12,8 | 12,7 | 13,7 | 13,4 | 13,3 | |
| 14,9 | 14,6 | 14,5 | 14,4 | 14,1 | 14,0 | 15,1 | 14,8 | 14,8 | |
| 16,3 | 15,9 | 15,9 | 15,8 | 15,5 | 15,4 | 16,6 | 16,2 | 16,2 | |
| 17,8 | 17,3 | 17,4 | 17,2 | 16,8 | 16,8 | 18,0 | 17,6 | 17,6 | |
| 19,3 | 18,7 | 18,8 | 18,6 | 18,1 | 18,2 | 19,5 | 19,0 | 19,1 | |
| 20,7 | 20,1 | 20,3 | 20,0 | 19,5 | 19,6 | 21,0 | 20,4 | 20,6 | |
| 22,1 | 21,5 | 21,7 | 21,4 | 20,8 | 21,0 | 22,3 | 21,7 | 22,1 | |
| 23,3 | 22,8 | 23,2 | 22,8 | 22,1 | 22,4 | 23,5 | 23,0 | 23,5 | |
| 24,5 | 24,0 | 24,7 | 24,2 | 23,4 | 23,8 | 24,8 | 24,2 | 25,0 | |
| 25,8 | 25,3 | 26,1 | 25,5 | 24,7 | 25,2 | 26,0 | 25,5 | 26,4 | |
| 27,0 | 26,5 | 27,4 | 26,7 | 26,0 | 26,6 | 27,2 | 26,7 | 27,7 | |
| 28,2 | 27,7 | 28,6 | 27,9 | 27,3 | 27,9 | 28,4 | 28,0 | 28,9 | |
| 29,4 | 28,9 | 29,9 | 29,2 | 28,6 | 29,3 | 29,7 | 29,2 | 30,1 | |
| 30,6 | 30,2 | 31,1 | 30,4 | 29,8 | 30,7 | 30,9 | 30,4 | 31,4 | |
| 31,8 | 31,4 | 32,3 | 31,6 | 31,1 | 32,0 | 32,1 | 31,7 | 32,6 | |
| 33,1 | 32,6 | 33,5 | 32,8 | 32,3 | 33,3 | 33,3 | 32,9 | 33,8 | |
| 34,3 | 33,9 | 34,8 | 34,0 | 33,5 | 34,5 | 34,6 | 34,1 | 35,1 | |
| 35,5 | 35,1 | 36,0 | 35,2 | 34,7 | 35,8 | 35,8 | 35,4 | 36,3 | |
| 36,7 | 36,3 | 37,2 | 36,5 | 35,9 | 37,0 | 37,0 | 36,6 | 37,5 | |
| 37,9 | 37,6 | 38,4 | 37,7 | 37,1 | 38,2 | 38,2 | 37,9 | 38,7 | |
| 39,1 | 38,8 | 39,6 | 38,9 | 38,2 | 39,4 | 39,5 | 39,1 | 40,0 | |
| 40,4 | 40,0 | 40,9 | 40,1 | 39,4 | 40,6 | 40,7 | 40,3 | 41,2 | |
| 41,6 | 41,3 | 42,1 | 41,3 | 40,5 | 41,9 | 41,9 | 41,6 | 42,4 | |
| 42,8 | 42,5 | 43,3 | 42,5 | 41,6 | 43,1 | 43,1 | 42,8 | 43,7 | |

Таблица 1 (окончание)

| Δ , км | IV-I | V-I | VI-I | IV-II | V-II | VI-II | IV-III | V-III | VI-III |
|---------------|------|------|------|-------|------|-------|--------|-------|--------|
| 10 | 7,1 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 6,8 | 6,8 | 7,2 | 7,0 | 7,0 |
| 20 | 7,7 | 7,5 | 7,5 | 7,5 | 7,4 | 7,3 | 7,8 | 7,6 | 7,6 |
| 30 | 8,6 | 8,4 | 8,4 | 8,4 | 8,2 | 8,2 | 8,7 | 8,4 | 8,4 |
| 40 | 9,7 | 9,5 | 9,5 | 9,5 | 9,2 | 9,2 | 9,8 | 9,5 | 9,5 |
| 50 | 11,0 | 10,7 | 10,7 | 10,7 | 10,4 | 10,4 | 11,0 | 10,7 | 10,8 |
| 60 | 12,3 | 12,0 | 12,0 | 11,9 | 11,6 | 11,7 | 12,3 | 12,0 | 12,1 |
| 70 | 13,7 | 13,3 | 13,4 | 13,3 | 12,9 | 13,0 | 13,7 | 13,3 | 13,5 |
| 80 | 15,0 | 14,7 | 14,8 | 14,6 | 14,2 | 14,4 | 15,2 | 14,7 | 14,9 |
| 90 | 16,2 | 16,1 | 16,3 | 16,0 | 15,6 | 15,7 | 16,6 | 16,1 | 16,3 |
| 100 | 17,5 | 16,7 | 17,5 | 17,4 | 16,9 | 17,1 | 18,1 | 17,5 | 17,8 |
| 110 | 18,8 | 17,9 | 18,8 | 18,6 | 17,8 | 18,5 | 19,5 | 18,9 | 19,3 |
| 120 | 20,0 | 19,1 | 20,0 | 19,9 | 19,0 | 19,9 | 20,8 | 20,0 | 20,7 |
| 130 | 21,2 | 20,4 | 21,3 | 21,1 | 20,2 | 21,2 | 22,1 | 21,2 | 22,1 |
| 140 | 22,5 | 21,6 | 22,5 | 22,4 | 21,5 | 22,5 | 23,3 | 22,4 | 23,3 |
| 150 | 23,7 | 22,8 | 23,7 | 23,6 | 22,7 | 23,7 | 24,5 | 23,7 | 24,6 |
| 160 | 24,9 | 24,0 | 25,0 | 24,8 | 23,9 | 25,0 | 25,7 | 24,9 | 25,8 |
| 170 | 26,1 | 25,3 | 26,2 | 26,1 | 25,2 | 26,2 | 27,0 | 26,1 | 27,0 |
| 180 | 27,3 | 26,5 | 27,4 | 27,3 | 26,4 | 27,4 | 28,2 | 27,3 | 28,2 |
| 190 | 28,6 | 27,7 | 28,6 | 28,5 | 27,6 | 28,7 | 29,4 | 28,5 | 29,5 |
| 200 | 29,8 | 28,9 | 29,9 | 29,7 | 28,9 | 29,9 | 30,6 | 29,7 | 30,7 |
| 210 | 31,0 | 30,1 | 31,1 | 31,0 | 30,1 | 31,2 | 31,8 | 30,9 | 31,9 |
| 220 | 32,2 | 31,3 | 32,3 | 32,2 | 31,3 | 32,4 | 33,0 | 32,2 | 33,3 |
| 230 | 33,4 | 32,5 | 33,6 | 33,4 | 32,5 | 33,7 | 34,2 | 33,4 | 34,4 |
| 240 | 34,6 | 33,7 | 34,8 | 34,7 | 33,8 | 34,9 | 35,5 | 34,6 | 35,6 |
| 250 | 35,8 | 35,0 | 36,0 | 35,9 | 35,0 | 36,1 | 36,7 | 35,8 | 36,8 |
| 260 | 37,1 | 36,2 | 37,2 | 37,1 | 36,2 | 37,4 | 37,9 | 37,0 | 38,1 |
| 270 | 38,3 | 37,4 | 38,5 | 38,4 | 37,5 | 38,6 | 39,1 | 38,2 | 39,3 |
| 280 | 39,5 | 38,6 | 39,7 | 39,6 | 38,7 | 39,9 | 40,3 | 39,4 | 40,5 |
| 290 | 40,7 | 39,8 | 40,9 | 40,8 | 39,9 | 41,1 | 41,5 | 40,7 | 41,8 |
| 300 | 41,9 | 41,0 | 42,1 | 42,0 | 41,2 | 42,4 | 42,7 | 41,9 | 43,0 |

глубин по многослойным скоростным моделям Кавказа ряда авторов [7–9] и осредненной блоковой модели 3DIM. В традиционной обработке землетрясений на Кавказе обычно используется годограф, предложенный Левицкой–Лебедевой для средней глубины $H = 25$ км. На рис. 3 для сравнения приведены годографы в редуцированном виде для $H = 0$ и 20 модели 1DIM и 3DIM Лебедевой–Левицкой и годограф Джеффриса для ближней зоны, рассчитанный нами по программе [6]. Отметим некоторые особенности приведенных годографов. В ближней зоне на эпицентральных расстояниях 0–10 км различия между годографами для приведенных глубин составляют ~ 2 с в модели 1DIM и порядка 1 с в модели 3DIM, что позволяет разделять эти глубины при расчете. Однако следует обратить особое внимание на то обстоятельство, что при ошибке во времени P -волны на таком эпицентральных расстоянии $\sim 0,5$ –1 с возникает вероятность большой ошибки в глубине очага.

Наиболее неудачное расстояние для разделения глубин оказывается 20–40 км, где все приведенные годографы отличаются мало (в пределах 0,5–0,8 с).

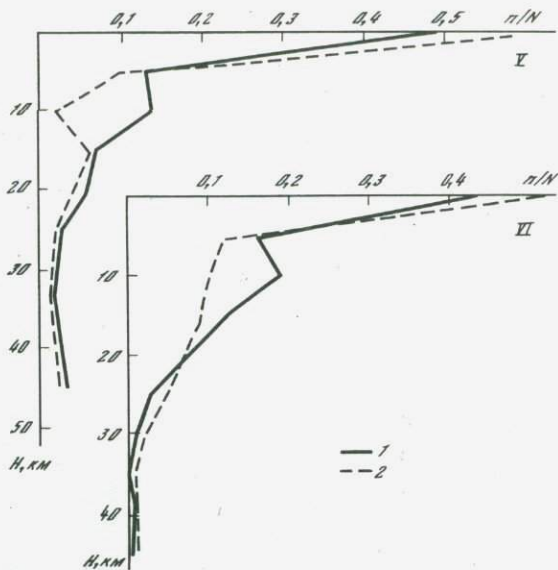
Если ближайшая станция оказывается на эпицентральных расстояниях 40–120 км, то использование годографа 1DIM даст большую глубину,

| IV-IV | V-IV | VI-IV | IV-V | V-V | VI-V | IV-VI | V-VI | VI-VI |
|-------|------|-------|------|------|------|-------|------|-------|
| 6,8 | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 6,5 | 6,4 | 6,9 | 6,8 | 6,7 |
| 7,4 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,0 | 7,0 | 7,5 | 7,3 | 7,3 |
| 8,2 | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 7,8 | 7,8 | 8,4 | 8,2 | 8,1 |
| 9,3 | 9,1 | 9,0 | 9,0 | 8,8 | 8,8 | 9,4 | 9,2 | 9,2 |
| 10,5 | 10,2 | 10,2 | 10,2 | 10,0 | 9,9 | 10,7 | 10,4 | 10,4 |
| 11,8 | 11,5 | 11,5 | 11,5 | 11,2 | 11,1 | 12,0 | 11,7 | 11,7 |
| 13,2 | 12,8 | 12,8 | 12,8 | 12,4 | 12,4 | 13,3 | 13,0 | 13,0 |
| 14,5 | 14,2 | 14,2 | 14,1 | 13,7 | 13,7 | 14,7 | 14,3 | 14,4 |
| 16,0 | 15,5 | 15,6 | 15,5 | 15,0 | 15,1 | 16,2 | 15,7 | 15,8 |
| 17,4 | 16,9 | 17,0 | 16,8 | 16,4 | 16,5 | 17,6 | 17,1 | 17,2 |
| 18,9 | 18,3 | 18,4 | 18,2 | 17,7 | 17,8 | 19,1 | 18,5 | 18,7 |
| 20,3 | 19,7 | 19,9 | 19,6 | 19,0 | 19,2 | 20,5 | 19,8 | 20,1 |
| 21,8 | 21,0 | 21,3 | 21,0 | 20,4 | 20,6 | 22,0 | 21,1 | 21,6 |
| 23,1 | 22,2 | 22,8 | 22,4 | 21,7 | 22,0 | 23,3 | 22,4 | 23,1 |
| 24,4 | 23,5 | 24,2 | 23,8 | 23,0 | 23,4 | 24,5 | 23,6 | 24,4 |
| 25,7 | 24,7 | 25,5 | 25,2 | 24,3 | 24,8 | 25,8 | 24,8 | 25,7 |
| 26,9 | 25,9 | 26,7 | 26,5 | 25,6 | 26,1 | 27,0 | 26,1 | 26,9 |
| 28,2 | 27,2 | 28,0 | 27,8 | 26,8 | 27,5 | 28,3 | 27,3 | 28,2 |
| 29,4 | 28,4 | 29,2 | 29,0 | 28,1 | 28,9 | 29,5 | 28,5 | 29,4 |
| 30,6 | 29,6 | 30,4 | 30,2 | 29,3 | 30,2 | 30,7 | 29,8 | 30,7 |
| 31,9 | 30,9 | 31,7 | 31,5 | 30,5 | 31,4 | 32,0 | 31,0 | 31,9 |
| 33,1 | 32,1 | 32,9 | 32,7 | 31,7 | 32,6 | 33,2 | 32,2 | 33,2 |
| 34,3 | 33,3 | 34,2 | 33,9 | 33,0 | 33,9 | 34,4 | 33,5 | 34,4 |
| 35,5 | 34,5 | 35,4 | 35,1 | 34,2 | 35,1 | 35,7 | 34,7 | 35,7 |
| 36,8 | 35,7 | 36,6 | 36,3 | 35,4 | 36,4 | 36,9 | 35,9 | 36,9 |
| 38,0 | 37,0 | 37,9 | 37,6 | 36,6 | 37,6 | 38,1 | 37,1 | 38,1 |
| 39,2 | 38,2 | 39,1 | 38,8 | 37,8 | 38,8 | 39,3 | 38,4 | 39,4 |
| 40,4 | 39,4 | 40,3 | 40,0 | 39,0 | 40,1 | 40,6 | 39,6 | 40,6 |
| 41,6 | 40,6 | 41,6 | 41,2 | 40,3 | 41,3 | 41,8 | 40,8 | 41,9 |
| 42,9 | 41,8 | 42,8 | 42,4 | 41,5 | 42,5 | 43,0 | 42,1 | 43,1 |

чем при использовании годографа 3DIM. В области $\Delta = 120$ –250 км годографы $H = 0$ и 20 заметно отличаются при любой модели среды.

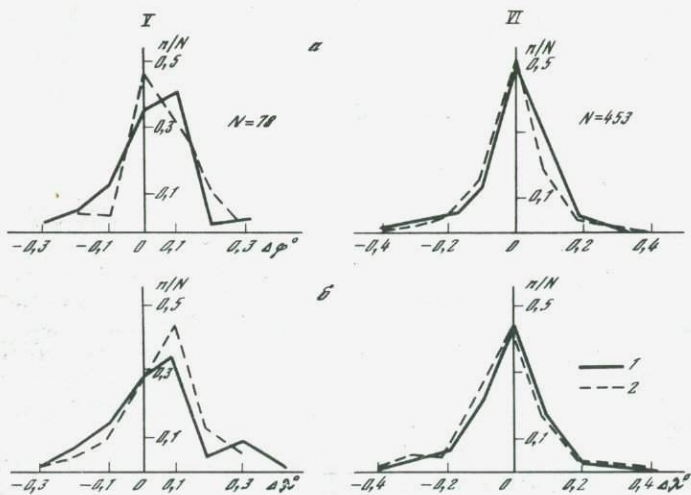
Следует также отметить, что блоковая модель среды в VI блоке более скоростная, чем одномерная модель всего Кавказа. Годограф Лебедевой–Левицкой на небольших расстояниях $\Delta \sim 20$ –100 км аналогичен одномерному годографу $H = 20$ км, но после 130 км ведет себя как годограф для глубины $H = 0$. Годограф Джеффриса заметно отличается от рассмотренных годографов, так как кора в модели Джеффриса является более высокоскоростной.

С использованием моделей 1DIM и 3DIM были определены параметры очагов Кавказа (~ 1500 землетрясений). Результаты сравнивались с ручной обработкой, проводимой в регионе. На рис. 4 (см. вкл.) приведены смещения эпицентров, рассчитанных нами в блоковой среде относительно ручной обработки (величина и направление смещения показаны стрелкой). В случае совпадения эпицентр показан кружком, стрелка отсутствует). Смещения по широте φ и долготы λ значительны только на краях региона. В центральной части (Джавахетское нагорье, Центральный Кавказ и др.) смещения практически отсутствуют. Проведены статистические оценки смещений по φ и λ для всех блоков. В качестве примера в работе приведе-



Р и с. 5. Распределение отклонения результатов машинного и ручного определения параметров эпицентра

а — по широте φ ; б — по долготе λ для V и VI блока; 1 — скоростная модель 1DIM; 2 — скоростная модель 3DIM



Р и с. 6. Распределение гипоцентров по глубине в V и VI блоках
1 — скоростная модель 1DIM; 2 — скоростная модель 3DIM

Таблица 2
Средний годограф Кавказа

| H, км | Времена вступлений P-волны, с | | | | | |
|-------|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 |
| 0 | 0,0 | 2,2 | 3,9 | 5,4 | 6,9 | 8,3 |
| 10 | 2,6 | 3,1 | 4,4 | 5,8 | 7,2 | 8,5 |
| 20 | 4,8 | 4,8 | 5,5 | 6,6 | 7,8 | 8,9 |
| 30 | 7,0 | 6,6 | 6,2 | 7,7 | 8,7 | 9,7 |
| 40 | 9,1 | 8,4 | 8,5 | 9,0 | 9,8 | 10,4 |
| 50 | 11,1 | 10,3 | 10,1 | 10,4 | 11,1 | 11,6 |
| 60 | 12,9 | 12,1 | 11,8 | 11,9 | 12,4 | 12,8 |
| 70 | 14,7 | 13,8 | 13,4 | 13,4 | 13,8 | 13,8 |
| 80 | 16,4 | 15,5 | 15,0 | 14,9 | 15,1 | 15,2 |
| 90 | 18,2 | 17,2 | 16,6 | 16,1 | 16,5 | 16,4 |
| 100 | 19,9 | 19,0 | 18,2 | 18,0 | 17,8 | 17,7 |
| 110 | 21,6 | 20,7 | 19,8 | 19,5 | 19,2 | 18,9 |
| 120 | 23,3 | 22,3 | 21,3 | 20,9 | 20,5 | 20,2 |
| 130 | 25,0 | 23,9 | 22,9 | 22,3 | 21,8 | 21,4 |
| 140 | 26,4 | 25,5 | 24,3 | 23,6 | 23,1 | 22,7 |
| 150 | 28,1 | 27,1 | 25,7 | 24,9 | 24,4 | 23,9 |
| 160 | 29,7 | 28,6 | 27,0 | 26,3 | 25,7 | 25,2 |
| 170 | 31,1 | 29,9 | 28,4 | 27,6 | 26,9 | 26,4 |
| 180 | 32,5 | 31,2 | 29,7 | 28,9 | 28,1 | 27,7 |
| 190 | 33,8 | 32,6 | 31,1 | 30,2 | 29,4 | 28,9 |
| 200 | 35,1 | 33,9 | 32,4 | 31,5 | 30,7 | 30,2 |
| 210 | 36,5 | 35,3 | 33,6 | 32,8 | 31,9 | 31,5 |
| 230 | 39,1 | 37,9 | 36,2 | 35,3 | 34,4 | 34,0 |
| 250 | 41,7 | 40,4 | 38,7 | 37,8 | 36,9 | 36,5 |
| 270 | 44,2 | 42,9 | 41,2 | 40,3 | 39,3 | 39,0 |
| 290 | 46,6 | 45,3 | 43,7 | 42,8 | 41,8 | 41,5 |
| 310 | 49,1 | 47,4 | 46,2 | 45,4 | 44,5 | 44,0 |
| 330 | 51,6 | 49,9 | 48,9 | 47,9 | 47,0 | 46,5 |
| 350 | 54,1 | 52,4 | 51,4 | 50,4 | 49,5 | 49,0 |
| 370 | 56,2 | 54,9 | 53,9 | 53,0 | 52,0 | 51,5 |
| 390 | 59,1 | 57,4 | 56,4 | 55,4 | 54,5 | 54,0 |
| 410 | 61,6 | 59,9 | 58,9 | 58,0 | 57,0 | 56,5 |
| 430 | 64,1 | 62,4 | 61,4 | 60,5 | 59,5 | 59,0 |
| 450 | 66,6 | 64,9 | 63,8 | 63,0 | 62,0 | 61,5 |

Таблица 3
Сравнение параметров гипоцентров, определенных при использовании различных моделей среды*

| Дата | Время | Параметры гипоцентров | | | Примечание |
|----------|------------|-----------------------|---------------------|----|-------------|
| | | $\varphi^{\circ} N$ | $\lambda^{\circ} E$ | H | |
| 21.03.80 | 21 24 27,8 | 43,25 | 41,62 | 0 | 1 Западный |
| | 26,3 | 43,09 | 41,57 | 16 | 2 Кавказ |
| | 26,3 | 43,11 | 41,57 | 16 | 3 |
| | 24,5 | 46,16 | 41,54 | 11 | 4 |
| 11.06.80 | 21 15 01,3 | 42,10 | 45,70 | 0 | 1 Восточный |
| | 14 59,0 | 42,07 | 45,74 | 15 | 2 Кавказ |
| | 59,0 | 42,09 | 45,78 | 10 | 3 |
| | 58,9 | 42,08 | 45,78 | 23 | 4 |

Таблица 3 (окончание)

| Дата | Время | Параметры гипоцентров | | | Примечание | |
|----------|-------|-----------------------|---------------------|-------|------------|----------------|
| | | $\varphi^{\circ} N$ | $\lambda^{\circ} E$ | H | | |
| 23.03.80 | 03 11 | 25,7 | 42,33 | 43,08 | 0 | 1 Центральный |
| | | 25,2 | 42,33 | 43,06 | 0 | 2 |
| | | 25,2 | 42,32 | 42,99 | 4 | 3 Кавказ |
| | | 23,2 | 42,36 | 43,08 | 9 | 4 |
| 06.06.80 | 13 53 | 33,5 | 42,03 | 44,12 | 0 | 1 Центральный |
| | | 32,3 | 41,94 | 44,13 | 8 | 2 Кавказ |
| | | 32,3 | 41,96 | 44,13 | 3 | 3 |
| | | 30,7 | 42,01 | 44,10 | 15 | 4 |
| 23.05.80 | 07 03 | 16,1 | 41,45 | 43,81 | 0 | 1 Джавахетское |
| | | 14,0 | 41,41 | 43,74 | 11 | 2 нагорье |
| | | 14,0 | 41,42 | 43,75 | 5 | 3 |
| | | 12,5 | 41,47 | 43,80 | 7 | 4 |

* 1 — ручное определение, 2 — модель 1DIM, 3 — модель 3DIM, 4 — программа М.А. Алексидзе.

ны оценки для блоков V и VI. На рис. 5 даны нормированные графики распределения отклонений φ и λ результатов машинной и ручной обработки, где $\Delta\lambda = \lambda_{\text{маш}} - \lambda_{\text{руч}}$. Смещения на север и восток соответственно имели знак Т. Среднее значение расхождения в блоке VI по $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$ равно нулю. А в блоке V наблюдается небольшой систематический сдвиг на север по φ , равный $\Delta\varphi = 0,1^{\circ}$ и по λ на восток, равный $\Delta\lambda = 0,1^{\circ}$.

Использование скоростных моделей 1DIM и 3DIM позволяет определить параметр H (глубину гипоцентра), отсутствующую при ручной обработке. На рис. 6 показаны нормированные распределения гипоцентров в разных блоках по глубине при использовании моделей 1DIM и 3DIM. Большая часть очагов приурочена к глубинам 0–5 км. Однако в обеих зонах имеется значительная часть очагов на глубинах 10–30 км. Следует отметить, что аналогичные результаты наблюдаются для других блоков.

Специально были рассчитаны параметры гипоцентров в режиме 3DIM и 1DIM землетрясений с энергетического класса $K > 10$ за 1980 г. для сравнения с ручной обработкой и результатами расчетов по программе М.А. Алексидзе [10]. В табл. 3 приведены некоторые из этих землетрясений. Сравнение показывает, что параметры φ и λ определяются без значительных расхождений ($\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda \leq 0,1^{\circ}$). По глубине имеются расхождения, связанные с различными представлениями о модели среды.

Вопрос о влиянии модели среды на численное значение параметра глубины H требует специального рассмотрения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондорская Н.В., Пивоварова Н.Б., Славина Л.Б. Восстановление скоростного поля в фокальной зоне с одновременным уточнением параметров гипоцентров. — В кн.: Применение численных методов в исследовании литосферы. Новосибирск, 1982, с. 108–118.
2. Славина Л.Б., Эпштейн А.Г. Определение времени в очаге землетрясения (t_0) по данным региональной сети станций. — В кн.: Алгоритмы и практика определения параметров гипоцентров землетрясений на ЭВМ. М.: Наука, 1983, с. 87–91.
3. Пивоварова Н.Б. Исследование точ-

- ности определения координат эпицентров. Наст. сб.
4. Бурмаков Ю.А., Винник Л.П., Треусов А.В. Некоторые особенности восстановления неоднородной модели среды для удаленных источников. — В кн.: Применение численных методов в исследовании литосферы. Новосибирск, 1982, с. 43—54.
 5. Biggs M.C. Minimization Algorithms Making use of non-quadratic Properties of Objective Functions. — J. Inst. Math. and Appl., 1971, vol. 8, N 3, p. 315—328.
 6. Епифанский А.Г., Кушнир Г.С. Определение параметров очагов локальных землетрясений в автоматизированной системе прогноза землетрясений СВК АСПЗ. — В кн.: Алгоритмы и практика определения параметров гипоцентров землетрясений на ЭВМ. М.: Наука, 1983, с. 52—62.
 7. Твалтвадзе Г.К. Строение земной коры в Грузии по сейсмическим данным и построение систем теоретических годографов. Тбилиси: Мицниереба, 1960.
 8. Мурузидзе Г.Я. Строение земной коры и верхней мантии в Грузии и сопредельных районах по сейсмологическим и сейсморазведочным данным. Тбилиси: Мицниереба, 1976.
 9. Саакян А.А. Станционные аномалии времен пробега P -волн от землетрясений Армянского нагорья. — Изв. АН АрмССР. Сер. наука о Земле, 1982, т. 35, № 1, с. 62—69.
 10. Алексидзе М.А., Аманаташвили Я.Т., Барамидзе Е.Л. и др. Определение координат гипоцентра близких землетрясений по известному скоростному строению (на примере Кавказского региона). — В кн.: Алгоритмы и практика определения параметров гипоцентров землетрясений на ЭВМ. М.: Наука, 1983, с. 69—81.

УДК 550.341.3+550.34.013.222

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НА ЭВМ МАГНИТУДО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

*С.В. Ларин, Л.Н. Поплавская, О.Н. Соловьева,
С.Л. Соловьев*

В Сахалинском комплексном научно-исследовательском институте ДВНЦ АН СССР, Тихоокеанской сейсмологической экспедиции Института физики Земли АН СССР и Института вулканологии и ДВНЦ АН СССР С.Л. Соловьевым, О.Н. Соловьевой, С.А. Федотовым и др. [1—12] был выполнен большой объем научно-исследовательских работ по созданию на Дальнем Востоке региональных шкал для оценки магнитуд и энергетических классов близких и местных землетрясений Курило-Охотского, Сахалинского регионов, а также землетрясений Камчатки и Командорских островов. В опытную эксплуатацию для энергетической классификации коровых землетрясений Северо-Востока СССР была принята шкала K , разработанная Т.Г. Раутиан [13].

Таким образом, к настоящему времени при составлении "Сейсмологического бюллетеня Дальнего Востока" используется целая система магнитудо-энергетических шкал, позволяющая выполнить оценки M и (или) K дальневосточных землетрясений в зависимости от глубины очага землетрясений, типа зарегистрированной сейсмической волны и динамического диапазона используемой аппаратуры.

В 1978 г. в СахКНИИ [14] на ЭВМ М-222 была реализована программа для определения магнитудно-энергетических характеристик близких землетрясений. Основу программы составили 15 таблиц калибровочных функций — магнитуды (M) и энергетического класса (K). Блок-схема алгоритма программы является схемой поиска необходимой таблицы.

Как видно из рис. 1, возможность оценить M и (или) K наиболее полно обеспечена для землетрясений с гипоцентрами на глубинах $h \leq 80$ км. Маг-

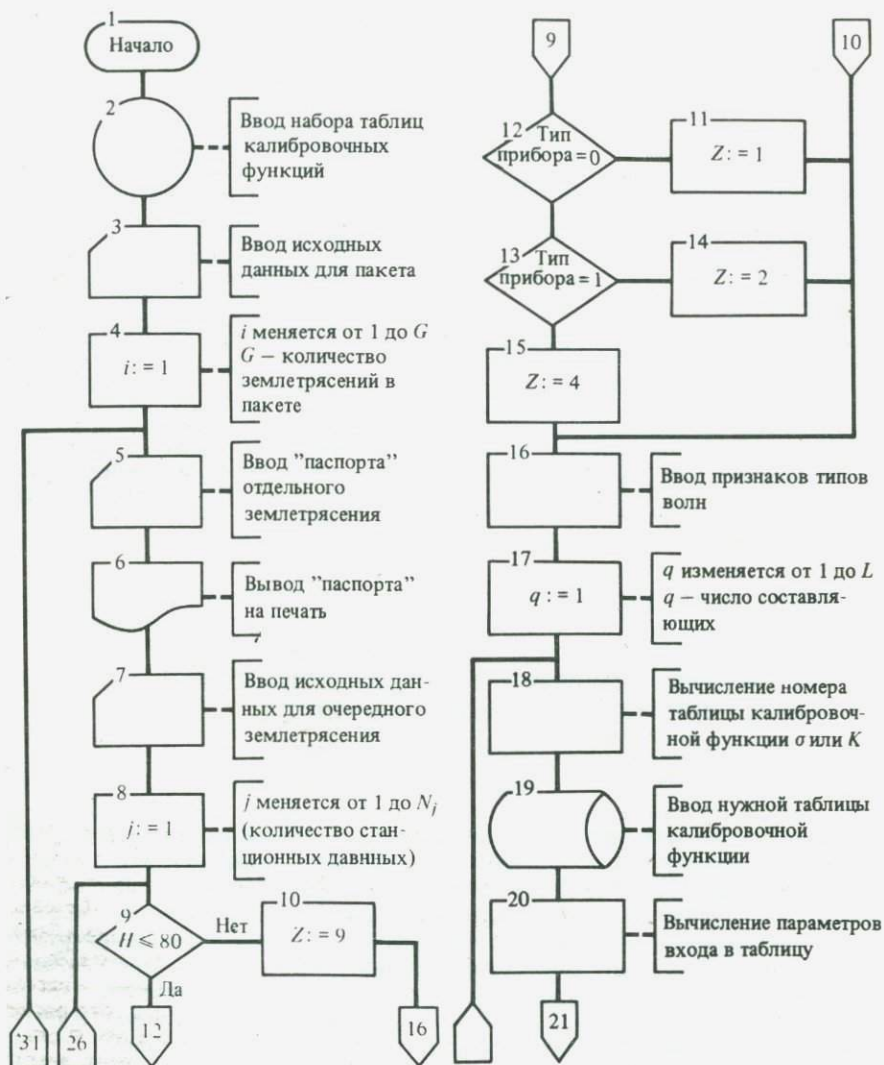
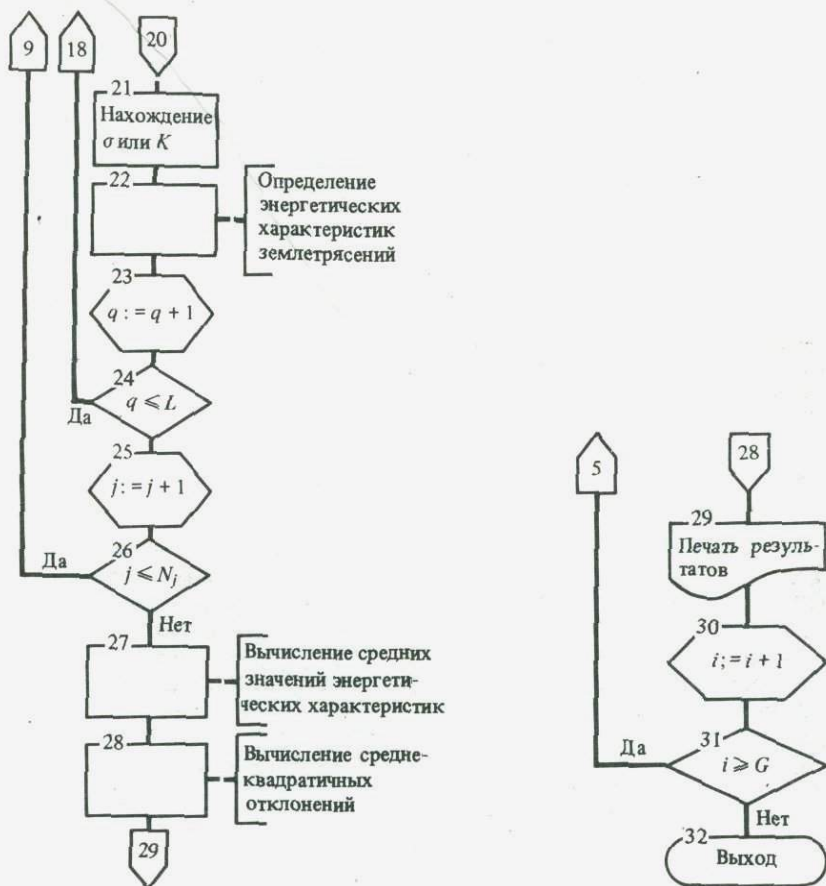


Рис. 1. Блок-схема программы

нидудная классификация более глубоких близких и местных землетрясений может быть осуществлена лишь по записи объемных волн аппаратурой СК, СКД, Пресс-Юинг. Так как в отдельных сейсмоактивных районах Дальнего Востока используются разные варианты таблиц для энергетической классификации землетрясений по записи аппаратурой регионального типа, содержания калибровочных таблиц KPV , KPH , KSH при необходимости можно менять по запросу с магнитоносителей, где они находятся на постоянном хранении.

Блок-схема самой программы, выполненная в обозначениях ГОСТ 19.002-80 и ГОСТ 19.003-80, для удобства читателя представлена в конце статьи (рис. 2). Не останавливаясь на общеизвестных расчетных форму-



Р и с. 1 (окончание)

Т а б л и ц а 1

Оценка точности магнитудных шкал для дальневосточных землетрясений

| Магнитуда | Тип аппаратуры | Объем выборки N | δM |
|-------------|----------------|-------------------|------------|
| $h = 80$ км | | | |
| MPH | УБОПЗ, Вихерт | 152 | 0,3 |
| MSH | То же | 180 | 0,4 |
| MPV | СК, СКД, П-Ю | 56 | 0,4 |
| MPH | То же | 56 | 0,4 |
| MSH | " | 20 | 0,6 |
| MLV | " | 148 | 0,2 |
| MLH | " | 182 | 0,3 |
| $h > 80$ км | | | |
| MPV | СК, СКД, П-Ю | 72 | 0,2 |
| MPH | То же | 47 | 0,3 |
| MSH | " | 156 | 0,3 |

Таблица 2

Оценка точности определения энергетических классов δK дальневосточных землетрясений

| Район | Δ , км | | | | | |
|---------------------------------|---------------|------------|----------|------------|-----------|------------|
| | 0 ÷ 50 | | 51 ÷ 100 | | 101 ÷ 200 | |
| | <i>N</i> | δK | <i>N</i> | δK | <i>N</i> | δK |
| Курильские острова | — | — | 41 | 0,4 | 51 | 0,3 |
| Камчатка и Командорские острова | | | | | | |
| $h \leq 80$ км | 30 | 0,4 | 33 | 0,3 | 64 | 0,2 |
| $h > 80$ км | 29 | 0,4 | 32 | 0,4 | 36 | 0,6 |
| О-в Сахалин | 11 | 0,3 | 33 | 0,3 | 60 | 0,3 |
| Северо-Восток | 14 | 0,1 | 31 | 0,2 | 33 | 0,1 |
| Приморье и Приамурье | 7 | 0,3 | 38 | 0,3 | 80 | 0,3 |

| Δ , км | | | | | | | | |
|---------------|------------|-----------|------------|----------|------------|--------------------|------------|--|
| 201 ÷ 400 | | 401 ÷ 600 | | > 600 | | Среднее по выборке | | |
| <i>N</i> | δK | <i>N</i> | δK | <i>N</i> | δK | <i>N</i> | δK | |
| 40 | 0,6 | 40 | 0,4 | 41 | 0,5 | 213 | 0,4 | |
| 66 | 0,3 | 65 | 0,4 | 31 | 0,6 | 289 | 0,3 | |
| 31 | 0,5 | 34 | 0,4 | 20 | 1,3 | 182 | 0,7 | |
| 58 | 0,2 | 22 | 0,2 | 20 | 0,2 | 204 | 0,3 | |
| 34 | 0,1 | 32 | 0,1 | 4 | 0,2 | 148 | 0,1 | |
| 103 | 0,2 | 43 | 0,2 | 8 | 0,1 | 279 | 0,2 | |

лах для определения M и K , отметим особенности работы программы, касающиеся поиска необходимой таблицы калибровочных функций.

Как следует из блок-схемы алгоритма, выход на определенную таблицу K , $\sigma(\Delta)$, $\sigma(\Delta, h)$ однозначно определяется набором следующих признаков: h — глубина гипоцентра; TP — тип прибора; TV — тип сейсмической волны. В программе дополнительно к перечисленным введена некая величина Z , которая может принимать значения 1, 2, 4, если $h \leq 80$ км. Тип прибора имеет в программе следующие числовые признаки: СКМ-3, ВЭГИК — 0; УБОПЭ, Вихерт — 1; СК, СКД, Пресс-Юинг — 2; типы сейсмических волн — 0, 1, 2, 3, 4 (PV, PH, SH, MLV, MLH соответственно). Как видим из блок-схемы программы, поиск осуществляется в два этапа: на

первом — по совокупности признаков h и TP величине Z присваивается одно из возможных значений; на втором — определяется номер таблицы по сумме $Z + TP + TV$.

В зависимости от характера и объема исходных данных о динамике сейсмических волн программа осуществляет для каждого землетрясения расчеты значений $MPV, MPH, MSH, MLV, MLH, K(KPV, KPH, KSH)$, и доверительных оценок этих величин σ_M, σ_K .

За период опытной эксплуатации программы в 1979—1982 гг. нами были получены достаточно представительные статистики σ_M и σ_K , что в свою очередь позволило перейти к оценкам надежности δM и δK используемых региональных шкал M и K (табл. 1, 2). Действительно, если σ_M (σ_K) — стандартное отклонение M (K) от среднего значения, N_j — число независимых определений M для отдельного землетрясения (число станций, участвовавших в определении конкретной магнитуды MPV, MPH и т. д. данного землетрясения), N^* — число землетрясений, для которых имеются определения данной магнитуды M и соответствующие каждому землетрясению значения σ_M , $N = \sum N_j$ — полное число независимых определений M (MPV, MPH и т. п.) по всем N^* землетрясениям, то

$$\delta M = \frac{1}{(N-1)} \sqrt{\sum_{i=1}^{N^*} [\sigma_M^2 (N_j^2 - 1)]}; \quad (1)$$

δM здесь характеризует внутреннюю сходимость соответствующей таблицы калибровочных функций $\sigma(\Delta)$ или $\sigma(\Delta, h)$.

Как видим (табл. 1), наиболее устойчивыми для дальневосточных землетрясений являются оценки магнитуды по поверхностным волнам (MLH), наименее устойчивыми — оценки MSH для неглубоких ($h \leq 80$ км) землетрясений. Последнее, вероятно, связано с трудностями уверенной идентификации волны S для $h \leq 80$ км, (значения MSH для глубоководных землетрясений оказались значительно более устойчивыми).

Наиболее детально удалось исследовать вопросы надежности энергетической классификации землетрясений (табл. 2). В целом все исследуемые шкалы K дают в областях своей применимости хорошо согласованные значения энергетических классов. Единственное исключение состав-



Рис. 2. Блок-схема алгоритма

ляет шкала $K_{\Phi 1,2}^{68}$ [12], для которой для $h > 80$ км и $\Delta > 600$ км, по-видимому, требуются уточнения ($\delta K = 1, 3$). В дальнейшем необходимо выяснить дополнительно наличие или отсутствие систематической компоненты в оценке δK .

Так как помещенные в табл. 1, 2 величины δM и δK характеризуют лишь внутреннюю сходимость региональных калибровочных таблиц M и K , в дальнейшем дополнительно к описанным будут проведены сопоставления этих таблиц с мировыми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анахин В.Д., Соловьев С.Л. Скорость колебания земной поверхности в короткопериодных продольных волнах неглубокофокусных курильских землетрясений. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1969, № 1, с. 13—21.
2. Соловьев С.Л. Магнитуда землетрясений. — В кн.: Землетрясения в СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1961, с. 83—102.
3. Соловьев С.Л. О региональных отличиях калибровочной кривой для определения магнитуды землетрясения по поверхностным волнам. — В кн.: Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: Наука, 1974, с. 55—60.
4. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. Скорость колебания земной поверхности в объемных волнах неглубокофокусных Курило-Камчатских землетрясений на расстояниях до 17° . — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1967, № 1, с. 37—60.
5. Соловьев С.Л., Соловьева О.Н. Соотношение между энергетическим классом и магнитудой курильских землетрясений. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1967, № 2, с. 13—23.
6. Соловьева О.Н. Определение магнитуды Курило-Камчатских землетрясений по записям механических сейсмографов. — В кн.: Тр. СахКНИИ. Южно-Сахалинск, 1972, вып. 29, с. 250—262.
7. Соловьева О.Н. Станционные поправки ΔMP для дальневосточных станций. — В кн.: Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: Наука, 1974, с. 60—65.
8. Соловьева О.Н., Волков И.Е. Определение магнитуды глубокофокусных землетрясений Охотского моря и Курильских островов. — В кн.: Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М.: Наука, 1974, с. 94—105.

УДК 550.348

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕТИ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И КАРТА ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ БАЙКАЛЬСКОЙ ЗОНЫ

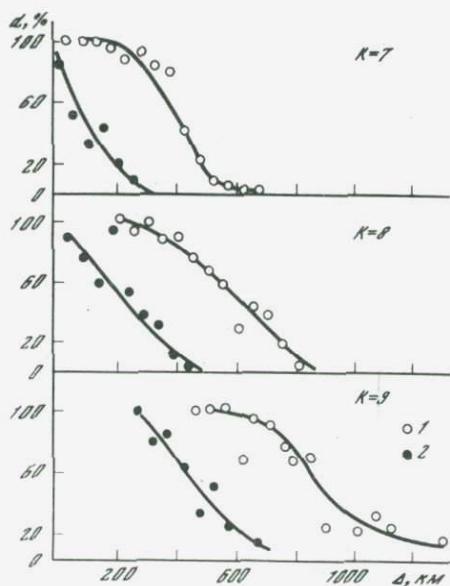
С.И. Голенецкий

Эффективность сети сейсмических станций в зависимости от поставленной задачи может рассматриваться с различных точек зрения. Даже при решении, казалось бы, одной задачи в различных случаях возможны разные подходы. Так, например, при развертывании или совершенствовании сети сейсмических станций оценка ее эффективности в основном имеет целью установление соответствия прогнозируемых будущих основных характеристик сети выдвигаемым требованиям. Несколько по-иному выглядит задача оценки фактической эффективности сети станций, уже накопившей и продолжающей накапливать сейсмические наблюдения. Такие оценки эффективности сети необходимы прежде всего при интерпретации сейсмических наблюдений.

Для Байкальской сети станций ранее оценивалась эффективность опре-

Р и с. 1. Зависимость числа землетрясений d , зарегистрированных сейсмической станцией Аршан, к общему количеству землетрясений, зарегистрированных сетью станций от эпицентрального расстояния Δ станции Аршан

Случаи регистрации: 1 — только поперечной волны; 2 — поперечной и продольной волн



деления основных параметров землетрясений в различных частях зоны [1, 2]. Данная работа ставит своей целью оценку полноты регистрации по зоне землетрясений различного энергетического уровня, т. е. анализ так называемой представительности землетрясений.

Поскольку сейсмические станции находятся в разных, подчас существенно отличающихся условиях, дальность регистрации землетрясений различной интенсивности оказывается заметно различной. Иногда оценка представительности землетрясений осуществляется теоретически на основе данных о чувствительности регистрирующей аппаратуры и закономерности затухания сейсмических волн с расстоянием [3], иногда — с использованием фактического материала о дальности регистрации землетрясений заданной энергии с учетом увеличения сейсмической аппаратуры. В последнем случае привлекаются данные о максимальной дальности регистрации сейсмических волн. Таким образом, например, оценивалась ранее представительность землетрясений в Байкальской зоне [4]. В несколько другом варианте — без дифференциации сейсмических станций по эффективности — сходный подход реализован при оценке представительности землетрясений Западной Тувы [5].

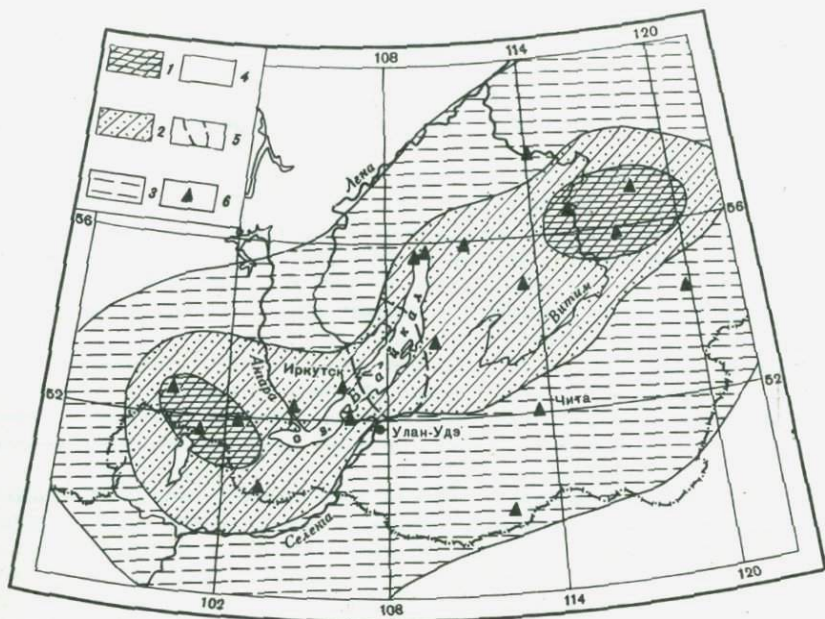
Следует, однако, заметить, что ориентировка на максимальную дальность регистрации в полном смысле слова вообще едва ли оправдана. Как показывает опыт, на максимальном удалении для данного энергетического класса сейсмической станцией отмечается лишь относительно небольшое число землетрясений в тех сравнительно немногочисленных случаях, когда условия распространения и регистрации сейсмических волн оказываются особенно благоприятными. Такие причины, как, например, уровень фона помех или особенности возбуждения и затухания сейсмических волн и т. д., в большей или меньшей степени, но часто весьма существенно сказываются на эффективности сейсмических наблюдений.

Очевидно, чтобы составить реальное представление об эффективности фактических станционных наблюдений, следует для каждой станции установить осредненные зависимости относительного числа регистрируемых

Дальность регистрации (км) землетрясений с $K = 7-9$ сейсмическими станциями Байкальской зоны

| Станция | Зарегистрированы волны | | | | | |
|-----------------|------------------------|---------|---------|-------------------------|---------|---------|
| | поперечные | | | поперечные и продольные | | |
| | $K = 7$ | $K = 8$ | $K = 9$ | $K = 7$ | $K = 8$ | $K = 9$ |
| | 90% землетрясений | | | | | |
| Аршан | 280 | 350 | 700 | 20 | 60 | 310 |
| Бодон | 200 | 230 | 600 | 40 | 110 | 200 |
| Бодайбо | 240 | 400 | 580 | 100 | 150 | 260 |
| Закаменск | 270 | 330 | 600 | 110 | 160 | 300 |
| Иркутск | (50) | 50 | 330 | — | — | (90) |
| Иркутск | — | 100 | 250 | — | 50 | 140 |
| Кумора | 75 | 200 | 380 | 40 | 40 | 230 |
| Кабанск | — | — | 70 | — | — | 50 |
| Монды | 300 | 350 | 550 | (80) | 250 | 400 |
| Неляты | — | (150) | 240 | — | — | 100 |
| Нижеангарск | 70 | 130 | 330 | 40 | — | 230 |
| Орлик | 270 | 300 | 670 | (40) | 160 | 330 |
| Северобайкальск | 50 | 50 | 400 | — | — | 120 |
| Средний Калар | 190 | 330 | 500 | 70 | (150) | 150 |
| Тырган | 170 | 230 | 450 | — | 140 | 270 |
| Тулик | 280 | 310 | 550 | 120 | 210 | 370 |
| Халчеранга | 370 | 470 | 600 | — | 280 | 520 |
| Ципикан | 240 | 330 | 560 | 60 | 210 | (250) |
| Чара | 140 | 250 | 450 | 20 | 110 | 300 |
| Чита | — | 270 | 660 | — | — | — |
| | 50% землетрясений | | | | | |
| Аршан | 420 | 600 | 880 | 110 | 220 | 470 |
| Бодон | 310 | 520 | 820 | 110 | 220 | 480 |
| Бодайбо | 470 | 580 | 870 | 200 | 230 | 430 |
| Закаменск | 430 | 520 | 850 | 180 | 290 | 420 |
| Иркутск | 80 | 220 | 450 | — | — | (170) |
| Иркутск | — | 220 | 500 | — | 120 | 230 |
| Кумора | 280 | 400 | 790 | 80 | 200 | 400 |
| Кабанск | — | 30 | 210 | — | — | 80 |
| Монды | 440 | 600 | 800 | (220) | 320 | 560 |
| Неляты | 230 | 400 | (650) | 40 | 120 | 220 |
| Нижеангарск | 240 | 340 | 800 | 50 | 160 | 360 |
| Орлик | 400 | 570 | 800 | (230) | 320 | 460 |
| Северобайкальск | 120 | 220 | 600 | 50 | 110 | 240 |
| Средний Калар | 470 | 650 | 870 | 250 | 380 | 500 |
| Тырган | 290 | 450 | 790 | 170 | 180 | 360 |
| Тулик | 450 | 670 | 970 | 250 | 350 | 530 |
| Халчеранга | 500 | 700 | 840 | 220 | 330 | 620 |
| Ципикан | 440 | 570 | 750 | 170 | 290 | (600) |
| Чара | 320 | 540 | 750 | 50 | 220 | 400 |
| Чита | — | 430 | — | — | 270 | 320 |

Примечание. В скобках данные неуверенные.



Р и с. 2. Карта представительности землетрясений Байкальской зоны для полноты регистрации

1-4 — области различных энергетических классов: 1 — $K > 7$; 2 — $K > 8$; 3 — $K > 9$; 4 — $K > 10$; 5 — граница района на Среднем Байкале, где представительность землетрясений с $K < 8$; 6 — сейсмические станции

землетрясений от эпицентрального расстояния и энергетического класса землетрясений. Эти зависимости позволят определить расстояния, до которых данной станцией регистрируются землетрясения заданного класса при заданном проценте возможных пропусков этих толчков. В принципе такие зависимости могут быть детализированы для разных трасс (групп очагов), разных периодов времени, разных условий работы на станциях и т. д. В настоящей работе подобная детализация осуществлялась лишь в минимальной степени и заключения основывались главным образом на осредненных зависимостях.

Источником исходного фактического материала служили бюллетени землетрясений Прибайкалья за 1976—1977 гг., содержащие результаты сводной обработки сейсмических наблюдений. В некоторых случаях дополнительно привлекались данные и за иные периоды времени. Состав сети сейсмических станций и ее основные характеристики отражены в [6, 7].

По указанному исходным данным составлены вспомогательные таблицы, отражающие, на каких эпицентральных расстояниях записаны каждой станцией землетрясения заданных классов из сводного бюллетеня. Выборки делались в двух вариантах: 1) когда станцией регистрируется только вступление более интенсивной поперечной волны (менее интенсивная продольная волна в этих случаях уже не регистрируется) и 2) когда отмечаются и продольные, и поперечные волны, что соответствует случаям более полной регистрации, позволяющей по наблюдениям отдельной сейсмической станции оценивать эпицентральное расстояние. Расстояния, на которых при данном энергетическом классе землетрясения регистрирует-

ся лишь поперечная волна, естественно, оказываются большими по сравнению со случаями совместной регистрации волн обоих типов.

За параметр искомой зависимости принималось d — отношение числа землетрясений заданного энергетического класса зарегистрированных станций к общему числу землетрясений этого же класса по материалам сводного бюллетеня.

Чем больше эпицентральное расстояние, тем, очевидно, меньше указанное отношение d . Расчет имеет смысл производить лишь для землетрясений ниже определенного энергетического класса, так как заведомо известно, что достаточно сильные землетрясения хорошо регистрируются сетью сейсмических станций в целом. В условиях Байкальской зоны указанные зависимости целесообразно определять для землетрясений ниже 10-го энергетического класса.

Примеры полученных кривых для сейсмической станции "Аршан" приведены на рис. 1. В таблице представлены значения расстояний, до которых каждой из рассмотренных станций согласно таким же кривым регистрируется 90 и 50% всех землетрясений, зафиксированных при сводной обработке сейсмических наблюдений.

Путем построения на планшете для каждой станции, как центра, окружности соответствующего радиуса можно выделить области, где землетрясения регистрируются с заданной степенью полноты, т. е. построить карту представительности землетрясений, учитывающую фактически сложившиеся условия сейсмической регистрации. При этом можно считать, что землетрясения фиксируются достаточно надежно в областях, выделяемых хотя бы двумя окружностями гарантированной регистрации поперечной волны и одной окружностью совместной регистрации продольной и поперечной волн.

На рис. 2 представлена построенная таким образом карта представительности землетрясений Байкальской сейсмической зоны, соответствующая полученным кривым зависимости d от Δ на различных сейсмических станциях для уровня регистрации 90%. Станции региональной сети в основном оборудованы приборами типа СКМ-3, но значения увеличений на станциях существенно различаются, изменяясь в пределах 20—50 тыс. [6, 7]. На отдельных станциях использовалась иная аппаратура или ее характеристики были нестандартны. На сейсмической станции "Иркутск" из-за значительных помех уровень чувствительности приборов в дневное время устанавливается ниже, чем ночью.

Согласно построенной карте в достаточно широкой области Байкальского рифта и сопредельных территорий представительными являются землетрясения с 8-го энергетического класса (по шкале Т.Г. Раутиан). Лишь в районе Среднего Байкала (о. Ольхон — п-ов Святой Нос) ввиду малой чувствительности аппаратуры сейсмической станции "Кабанск" представительность землетрясений 8-го класса все же не была вполне обеспечена. В последние годы с открытием сейсмической станции на западном берегу Байкала в бухте Солонцовой этот недостаток исправлен.

Представительность землетрясений 9-го класса выдерживается почти на всей территории зоны. Толчки 7-го класса представительны лишь на отдельных площадях. Фактически эти площади могут быть еще меньше, поскольку при сводной обработке сейсмических наблюдений не исключается пропуск части непредставительных землетрясений. В этом случае значения параметра d рассчитываются с некоторым превышением и, следовательно, будут в какой-то мере завышены радиусы окружностей, используемые при построениях карты представительности землетрясений.

Площади, на которых представительны землетрясения различных энер-

гетических классов, на полученной карте (рис. 2) оказываются меньше по сравнению с картой, построенной ранее Л.Р. Леонтьевой и В.М. Кочетковым по данным о максимальных расстояниях регистрации толчков различных классов [4, 8]. Это вполне естественно, если учесть различия в использованных подходах решения задачи. Можно было бы, однако, ожидать и значительно больших отличий, поскольку установленные в настоящей работе максимальные дальности регистрации поперечных волн весьма существенно превышают значения, указанные в [4]. Эти значения лучше согласуются с приведенными выше в таблице максимальными расстояниями для случая одновременной регистрации продольных и поперечных волн.

Резюмируя результаты настоящей работы, можно сказать, что предложенная методика оценки эффективности сети сейсмических станций позволяет получить реальные характеристики полноты регистрации землетрясений различных энергетических классов (районировать представительность землетрясений в зоне), что имеет существенное значение при интерпретации сейсмических наблюдений.

Автор выражает благодарность сотрудникам лаборатории региональной сейсмичности и сети сейсмических станций Института земной коры СО АН СССР, принимавшим участие в подборе обширного исходного фактического материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Голенецкий С.И., Первалова Г.И.* Об эффективности сети сейсмических станций Прибайкалья при изучении его сейсмичности. — В кн.: Вопросы оптимизации и автоматизации сейсмических наблюдений. Тбилиси: Мецниереба, 1977, с. 58—70.
2. *Голенецкий С.И., Первалова Г.И.* Результаты определения гипоцентров землетрясений Байкальской зоны на ЭВМ и проблема оценки погрешностей. — В кн.: Сейсмо тектоника и сейсмичность района строительства БАМ. М.: Наука, 1980, с. 101—112.
3. *Аранович З.И., Ахалбедяшвили А.М., Гоцадзе О.Д., Деканосидзе Ц.А.* Методика расчета эффективности сети региональных сейсмических станций на примере Кавказа. — В кн.: Вопросы оптимизации и автоматизации сейсмических наблюдений. Тбилиси: Мецниереба, 1977, с. 27—57.
4. *Леонтьева Л.Р., Кочетков В.М.* О представительности землетрясений Байкальской сейсмической зоны. — В кн.: Сейсмология и сейсмогеология: (Научная информация). Иркутск 1972, с. 3—6.
5. *Гайский В.Н., Жалковский Н.Д.* Исследование повторяемости землетрясений Западной Тувы. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1971, № 9, с. 16—27.
6. Материалы по сейсмичности Сибири в 1976 г.: Региональные сети сейсмических станций. Обозначения. Каталог землетрясений Алтае-Саянской зоны/ Под ред. С.И. Голенецкого. Иркутск, 1978. 53 с.
7. Материалы по сейсмичности Сибири в 1977 г./Под ред. С.И. Голенецкого. Иркутск, 1979. 55 с.
8. *Голенецкий С.И., Букина К.И., Новомейская Ф.В.* и др. Землетрясения Прибайкалья. — В кн.: Землетрясения в СССР в 1970 г. М.: Наука, 1973, с. 124—146.

О РАЗДЕЛЕНИИ ДВУХ НАЛОЖИВШИХСЯ ИМПУЛЬСОВ

Д.В. Долгополов, А.И. Пасторов

При определении параметров очага землетрясения по наблюдениям в дальней зоне по методу Брюна¹ требуется, чтобы амплитудный спектр объемной волны аппроксимировался двумя прямыми, как показано на рис. 1.

Добавим, что амплитудный спектр не может рассматриваться в отрыве от фазового, поэтому зададим и фазовый спектр искомой волны в виде линейной функции, что также соответствует указанному методу.

После прохождения волны через сейсмограф с гальванометрической регистрацией амплитудный и фазовый спектры импульсы трансформируются в спектры его сейсмограммы и будут иметь вид, изображенный на рис. 2. Заметим, что сейсмограф мало искажает фазовый спектр сигнала.

Однако спектры, рассчитанные по участкам реальных сейсмограмм, сильно отличаются от требуемой модели (рис. 3), так как соответствуют записям сейсмических колебаний, содержащих сумму искомой волны и некоторой волны-помехи, соизмеримой по амплитуде с искомой.

В таких случаях определять по амплитудному спектру суммарного сигнала параметры модельного спектра Ω_0 и ω_c (рис. 1) некорректно и встает задача выделения амплитудного и фазового спектров искомой волны по спектрам суммарного сигнала.

Такая задача разрешима в приближенном виде для случая наложения двух сигналов, амплитудные и фазовые спектры которых имеют простую, наперед заданную формулу².

Рассмотрим сумму $f(t)$ двух произвольных импульсов $f_1(t)$ и $f_2(t)$, которым соответствуют амплитудные и фазовые спектры $R(\omega)$, $\psi(\omega)$; $r_1(\omega)$, $\varphi_1(\omega)$; $r_2(\omega)$, $\varphi_2(\omega)$ ³.

Введем обозначения: $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ и $\alpha = r_2/r_1$. Поскольку комплексный спектр суммы импульсов равен сумме комплексных спектров слагаемых, имеем

$$R e^{i\psi} = r_1 e^{i\varphi_1} + r_2 e^{i\varphi_2} = r_1 (1 + \alpha e^{i\varphi}).$$

Тогда амплитудный спектр суммарного сигнала будет равен

$$R = r_1 \text{Mod} (1 + \alpha e^{i\varphi}) = r_1 \sqrt{1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \varphi} \quad (1)$$

и фазовый спектр определится выражением

$$\psi = \varphi_1 + \text{Arg} (1 + \alpha e^{i\varphi}). \quad (2)$$

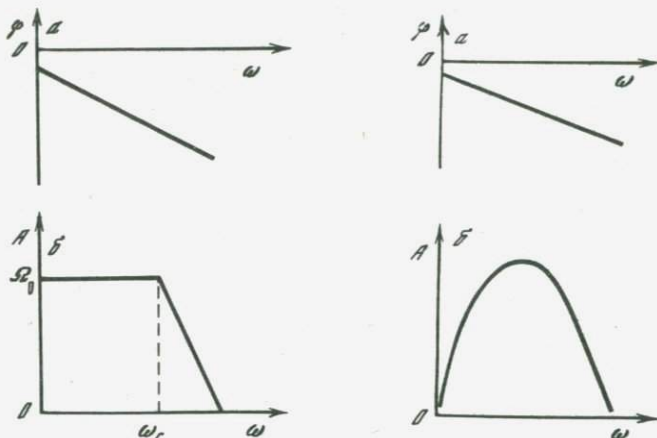
В общем случае амплитудные спектры r_1 и r_2 могут пересекаться (рис. 3), т. е. в интервале частот $[0, \omega_0)$, $\alpha > 1$, а в интервале $(\omega_0, \omega_b]$, где ω_b — верхняя частота в спектре, $\alpha < 1$.

Так как анализ формул (1) и (2) удобен при $\alpha \leq 1$, мы введем обозна-

¹ Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. — J. Geophys. Res., 1970, vol. 75, N 26, p. 4997—5009.

² Вообще говоря, допустимо наличие записи более двух импульсов. Важно, чтобы на выбранном участке сейсмограммы было не более двух соизмеримых по амплитуде сигналов с простой формой спектров. Остальные, меньшие по амплитуде импульсы не внесут существенных искажений в форму сигнала-помехи.

³ В дальнейшем для краткости мы будем опускать в записи независимую переменную ω .



Р и с. 1. Спектры: (а) фазовый и (б) амплитудный Ω_0 — спектральная плотность на низких частотах; ω_c — угловая частота

Р и с. 2. Спектры: (а) фазовый и (б) амплитудный.

чения r_g, r_n, φ_g и φ_n таким образом, чтобы индекс g присваивался спектру, у которого в данном интервале частот амплитудный спектр r_g доминирует над амплитудным спектром r_n — подчиненным, т. е. $r_g > r_n$. На рис. 3, например, в интервале $[0, \omega_c = 0,032]$ $r_g = r_2$ и $\varphi_g = \varphi_2$, а в интервале $(0,032, \omega_b = 0,080]$ $r_g = r_1$ и $\varphi_g = \varphi_1$.

Тогда на всей оси частот

$$0 < \alpha = \frac{r_n}{r_g} \leq 1 \text{ и } \varphi = \varphi_n - \varphi_g \text{ и уравнения (1) и (2) примут вид}$$

$$R = r_g \sqrt{1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \varphi}, \quad (3)$$

$$\psi = \varphi_g + \text{Arg}(1 + \alpha e^{i\varphi}) = \varphi_g + \arctg \frac{\alpha \sin \varphi}{1 + \alpha \cos \varphi}. \quad (4)$$

Помня, что $\alpha < 1$, из (3) нетрудно увидеть, что величина R колеблется около r_g . Как раз эти-то колебания и осложняют амплитудные спектры участков сейсмограмм, содержащих запись суммы наложенных друг на друга импульсов.

Аналогично амплитудному ведет себя и фазовый спектр суммарного сигнала. Второй член правой части равенства (4) имеет знакопеременный характер, так как при $\alpha < 1$ знаменатель дроби при любом φ остается положительным, в то время как $\sin \varphi$ меняет знак, а вместе с ним и $\arctg \frac{\alpha \sin \varphi}{1 + \alpha \cos \varphi}$. В результате величина ψ колеблется около φ_g .

Вышеизложенный качественный анализ формул (3) и (4) показывает, что, задаваясь формой r_g и φ_g , мы можем восстановить их, пользуясь тем обстоятельством, что они являются функциями, осредняющими известные нам R и ψ .

Перейдем теперь к выработке формализованных критериев определения r_g и φ_g и соответственно r_n и φ_n по уравнениям (3) и (4).

Формализуем вначале допущения, связанные с простой формой модель-

ных спектров. Так как r_g и r_n являются медленно меняющимися функциями частот, примем, что во всем интервале частот

$$dr_g/d\omega = 0 \text{ и } d\alpha/d\omega = 0. \quad (5)$$

Кроме того, в связи с линейным характером φ_g и φ_n имеем

$$d^2\varphi_g/d\omega^2 = 0 \text{ и } d^2\varphi_n/d\omega^2 = 0. \quad (6)$$

Проанализируем формулы (3) и (4) с учетом (5) и (6).

1. Исследуем положение экстремумов R .

Беря производную от правой и левой части равенства (3), получим

$$\frac{dR}{d\omega} = -(1 + \alpha^2 + 2\alpha \cos \varphi) \frac{1}{2} r_g \alpha \sin \varphi \frac{d\varphi}{d\omega}.$$

На частотах $\omega = \omega_{I(K)}$, соответствующих экстремумам R , $\left. \frac{dR}{d\omega} \right|_{\omega = \omega_{I(K)}} = 0$ и отсюда

$$r_g \alpha \sin \varphi \frac{d\varphi}{d\omega} = 0. \quad (7)$$

Так как при любых ω $\frac{d\varphi}{d\omega} \neq 0$, $\alpha \neq 0$ и $r_g \neq 0$, равенство (7) справедливо только при $\sin \varphi = 0$, т. е. на частотах $\omega = \omega_{I(K)}$, при которых

$$\varphi(\omega_{I(K)}) = \pi k \quad (K = 0, 1, 2, \dots). \quad (8)$$

Иными словами, экстремумы амплитудного спектра суммарного сигнала приходятся на частоты $\omega_{I(K)}$, при которых $\varphi(\omega_{I(K)}) = \pi K$.

Сами же экстремальные значения R , как следует из (3) и (8) будут равны

$$R_{\max}(\omega_{I(2K)}) = r_g(1 + \alpha); \quad \varphi(\omega_{I(2K)}) = 2\pi K, \quad (9)$$

$$R_{\min}(\omega_{I(2K+1)}) = r_g(1 - \alpha); \quad \varphi(\omega_{I(2K+1)}) = \pi(2K + 1).$$

Откуда с учетом (5) следует, что

$$r_{g\text{cp}} = \frac{R_{\max} + R_{\min}}{2}, \quad (10)$$

где R_{\max} и R_{\min} — два соседние значения экстремумов R ; $r_{g\text{cp}}$ — значение r_g на пересечении с R на частоте $\omega_{I(2K)} < \omega < \omega_{I(2K+1)}$.

Из (9) следует также, что

$$R_{\max} = r_g + r_n \quad \text{при } \omega = \omega_{I(2K)}, \quad (11)$$

$$R_{\min} = r_g - r_n \quad \text{при } \omega = \omega_{I(2K+1)}.$$

2. Из рассмотрения формулы (4) видно, что в точках $\omega = \omega_{m(K)}$, где $\psi - \varphi_g = 0$, $\sin \varphi$ обращается в 0, поскольку $\text{tg}(\psi - \varphi_g) \neq 0$, $(1 + \alpha \cos \varphi) \neq 0$ и $\alpha \neq 0$. Следовательно, $\varphi(\omega_{m(K)}) = \pi k$ ($K = 0, 1, 2, \dots$).

Таким образом, если принятая модель спектров близка к спектрам двух реальных наложившихся сигналов, то частоты, на которых находятся экстремумы модуля спектра суммарного зарегистрированного на сейсмограмме колебания, будут близки к частотам, к которым приурочены точки пересечения фазового спектра суммарного колебания с фазовым спектром φ_g . То есть

$$\omega_m(k) \approx \omega_l(k). \quad (12)$$

3. Изучим более подробно поведение кривой ψ в точках пересечения с φ_g , для чего вычислим вторую производную от ψ при условии $\psi - \varphi_g = 0$. Из (4) с учетом (5) и (6), опуская несложные выкладки, получим

$$d^2 \psi / d\omega^2 = 0 \text{ при } \psi = \varphi_g \text{ и } \varphi = \pi k \text{ (} K = 0, 1, 2, \dots \text{)}. \quad (13)$$

Другими словами, ψ и φ_g пересекаются в точках, соответствующих частотам, где фазовый спектр суммарного сигнала имеет перегибы.

Полученные в результате анализа формул (3) и (4) соотношения (10), (11), (12) и (13) позволяют, во-первых, проверить адекватность реального спектра сейсмограммы наперед заданной модели, во-вторых, в точках $\omega_{l(k)} \approx \omega_{m(k)}$ определить $r_g, r_n, \varphi_g, \varphi_n$ и, имея в виду заданную форму спектров r_g, r_n, φ_g и φ_n , при помощи интерполяции построить эти спектры во всем рассматриваемом интервале частот.

Изложенная методика может быть проиллюстрирована на примере, приведенном на рис. 3.

1. Рассмотрим участок частот, где $R \geq 1/10 R_{\max}$. Нетрудно заметить, что фазовый спектр ψ (рис. 3, б) участка сейсмограммы (рис. 3, а) в интервале частот $[0; 0,032]$ имеет колебательный характер и может быть осреднен прямой φ_2 ; в интервале $\omega (0,032; 0,08]$ ψ колеблется около прямой φ_1 , имеющей меньший угловой коэффициент, чем φ_2 . Частота $\omega_{m(0)} = 0,032$, на которой φ_2 и φ_1 пересекаются, является частотой смены доминирования амплитудных спектров, т.е. амплитудные спектры так же, как и фазовые, пересекаются на $\omega_{l(0)} = 0,032$. Согласно с принятыми обозначениями на интервале частот от 0 до 0,032 $r_2 = r_g$; $\varphi_2 = \varphi_g$; $r_1 = r_n$; $\varphi_1 = \varphi_n$; а в диапазоне частот от 0,032 до 0,08 $r_1 = r_g$; $\varphi_1 = \varphi_g$; $r_2 = r_n$; $\varphi_2 = \varphi_n$.

2. Найдем точки $\omega_{m(k)}$, в которых наблюдаются перегибы суммарного фазового спектра ψ . Их достаточно точно можно определить из графика ψ : 0,016 рад; 0,024; 0,032; 0,041; 0,049 рад.

Как видно из рис. 3, б, в $\omega_{l(x)}$ совпадают с $\omega_{m(k)}$, что согласно (12) говорит о хорошем совпадении заданных моделей с реальными спектрами.

3. Проведем согласно (13) через точки $\omega_{m(k)}$ прямые φ_1 и φ_2 .

4. В точках $\omega_{l(2K)} < \omega < \omega_{l(2K-1)}$ согласно (10) на пересечении с R определим r_g . На участке $(0; 0,032]$ это будут точки 1 и 2, а участке $(0,032; 0,08]$ — точки 3 и 4. Кроме того, на частоте $\omega = 0,032$, там, где $r_1 = r_2$ и $\alpha = 1$, определим точку пересечения двух искомого амплитудных спектров исходя из (11). Это будет точка 0.

5. Исходя из наперед заданной формы спектров (см. рис. 2) r_1 и r_2 проведем гладкую кривую r_2 через точки 1, 2 и 0 и через начало координат.

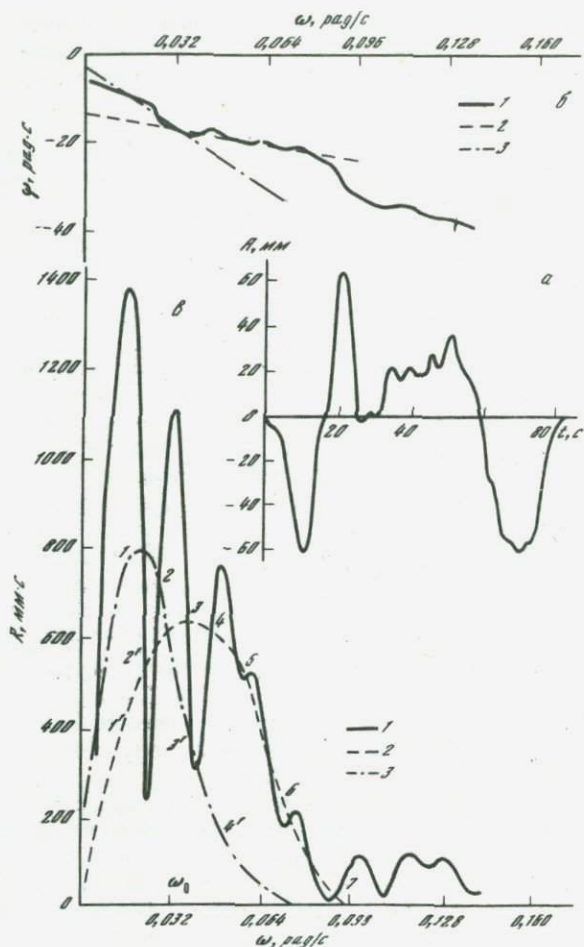
6. Теперь, зная r_2 на всем интервале от 0 до 0,032, по формуле (11) достроим точки 1' и 2', относящиеся к r_1 , и проведем гладкую кривую r_1 через точки 1', 2', 3, 4, а также через точки 5, 6 и 7, которые с очевидностью можно отнести к r_1 , так как на этих частотах r_2 уже мало.

7. Имея теперь целиком кривую амплитудного спектра r_1 , достроим, пользуясь (11), точки 3' и 4' спектра r_2 , через которые и проведем недостающий отрезок кривой r_2 на интервале $(0,032; 0,08]$.

В результате описанной процедуры была решена задача разделения спектров R и ψ суммарного колебания, рассчитанного по участку сейсмограммы (рис. 3, а), на спектры r_1 ; φ_1 и r_2 , φ_2 , являющимися образами двух импульсов. Один из этих импульсов и есть та волна, по амплитудному спектру которой следует определять параметры источника.

Остается выяснить, который спектр является спектром искомой волны.

Важной характеристикой фазового спектра является его производная.



Р и с. 3. Начальный участок сейсмограммы землетрясения 23.11. 1980 г. в Южной Италии и его обработка методом разделения спектров

a — суммарный импульс; *б* — фазовые спектры суммарного (ψ) и исходных (φ_1 и λ_1) импульсов; *в* — амплитудные спектры суммарного (R) и исходных (r_1 и r_2) импульсов; ω_0 — частота смены доминирования спектров

Выясним смысл этой характеристики. Для импульса $f(t)$ фазовый спектр имеет вид

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{\text{Im}S(i\omega)}{\text{Re}S(i\omega)},$$

где

$$S(i\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Производная фазового спектра

$$\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} = \frac{[\text{Im}S(i\omega)]'_{\omega} \text{Re}S(i\omega) - [\text{Re}S(i\omega)]'_{\omega} \text{Im}S(i\omega)}{\text{Re}^2 S(i\omega) + \text{Im}^2 S(i\omega)} = \rho = \text{const},$$

поскольку мы рассматриваем импульсы с $\varphi(\omega)$, линейно зависящим от частоты. В частности, при $\omega = 0$ $\text{Im}S(0)$ обращается в ноль

$$\text{и } \left. \frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=0} = \frac{[\text{Im}S(i\omega)]' \omega}{\text{Re}S(i\omega)} \bigg|_{\omega=0} = - \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt} = p.$$

Следовательно, наклон линейного фазового спектра, взятый с обратным знаком, совпадает с положением на оси времени центра тяжести импульса $f(t)$.

В нашем примере $d\varphi_1/d\omega = 10,0$ с, а $d\varphi_2/d\omega = 63,0$ с, откуда видно, что спектры r_1 и S_1 соответствуют ранее вступившей волне. Так как мы в данном случае хотели выделить волну P , то r_1 и есть амплитудный спектр волны P , соответствующий заданной модели и пригодный для корректного определения его параметров Ω_0 и ω_c .

Для реализации изложенного алгоритма необходимо иметь в распоряжении программу расчета модуля и аргумента комплексного преобразования Фурье. Причем фазовый спектр должен быть рассчитан, как непрерывная функция, о чем говорится ниже.

Для удобства обработки фазовых спектров в рамках изложенной методики при расчете фазовых спектров следует применять процедуру "спрямления фазового спектра". Эта процедура необходима, чтобы избавиться от разрывов в фазовом спектре, связанных с тем, что алгоритм БПФ предусматривает расчет только главных значений фазового спектра, заключенных в интервале $-\pi \leq \text{Arg}S(i\omega) \leq \pi$. Алгоритм "спрямления" заключается, в том, что отдельные ветви фазового спектра смещаются на величины $2\pi n$, где n — номер ветви, таким образом, что фазовый спектр становится непрерывной функцией. Такая процедура законна, так как $\text{Arg}S(i\omega)$ является многозначной функцией с периодом 2π . Аналитическое выражение алгоритма "спрямления" имеет вид

$$\varphi_1^c = \varphi_1^c; \quad \varphi_j^c = \varphi_j^c + [\varphi_j^p - \varphi_{j-1}^p] + A,$$

где

$$A = \begin{cases} 0 & \text{при } |\varphi_j^p - \varphi_{j-1}^p| < \pi \\ 2\pi & \text{при } (\varphi_j^p - \varphi_{j-1}^p) \leq -\pi \\ -2\pi & \text{при } (\varphi_j^p - \varphi_{j-1}^p) \geq \pi. \end{cases}$$

Здесь φ_j^c — "спрямленное" значение фазового спектра в первой точке ($\omega = 0$), φ_j^p — значение расчетного фазового спектра.

В заключение авторы выражают благодарность Л.А. Розенкнопу и М.Г. Бруку за помощь в математических вопросах.

ПРИМЕНЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА В ЗАДАЧАХ ПОВЫШЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ В СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ

А.И. Иващенко, Н.В. Краева, И.Н. Тихонов

В практике инструментальных сейсмологических наблюдений часто возникает необходимость уточнения формы амплитудно-частотной характеристики сейсмографа для подавления тех или иных локальных микросейсм. В СахКНИИ разработан комплекс программ, реализующий спектральный подход к решению этой задачи. Уточнение амплитудно-частотной характеристики производится в три этапа:

1) программа FORM, реализует определение формы спектрального окна помех в полосе пропускания сейсмографа по представительной выборке оцифрованных записей наиболее типичных микросейсм в точке наблюдения;

2) Программа DEVICE реализует построение амплитудно-частотной характеристики сейсмографа по заданным параметрам T_s, D_s, T_g, D_g и σ^2 . Значения параметров, обеспечивающих характеристику, максимально соответствующую форме окна помех, находятся перебором;

3) Программа CONVERS реализует пересчет в полученную частотную характеристику оцифрованных записей микросейсм и землетрясений, позволяет проконтролировать правильность подбора параметров сейсмографа, определить постоянное увеличение U_0^* и изменение отношения сигнал-шум в результате перехода к новой частотной характеристике.

Основу алгоритма составляет процедура счета дискретного спектра Фурье. Пусть $X_{-n}, \dots, X_0, X_1, \dots, X_{n-1}$ — дискретная запись временного процесса длительностью $T = N\Delta t$, где Δt — шаг дискретизации в с, $N = 2n$ — четное число отсчетов. Конечный ряд Фурье этого процесса задается формулой [1]

$$X_m = \frac{1}{N} \sum_{i=-n}^{n-1} x_i \exp(-j 2\pi i m / N),$$

$$m = -n, \dots, 0, 1, \dots, n-1, \quad (1)$$

где m — номер гармоники, соответствующий частоте $f_m = m/T$; X_m — комплексная амплитуда m -й гармоники.

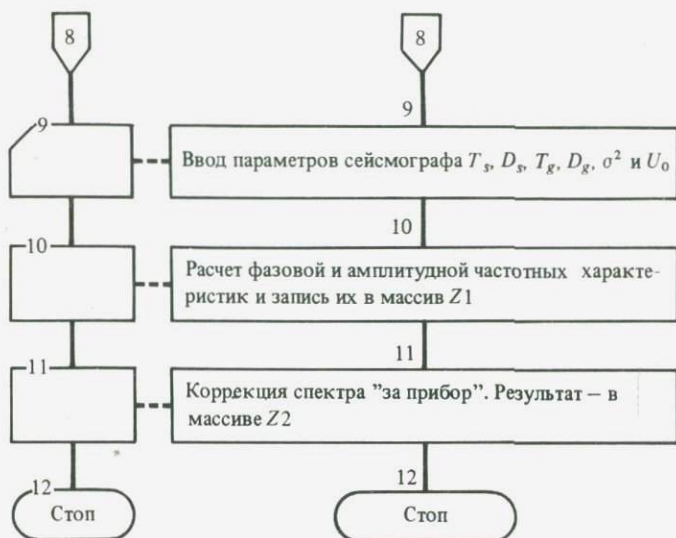
Обратное по отношению к (1) преобразование дает исходный процесс:

$$x_i = \sum_{m=-n}^{n-1} X_m \exp(j 2\pi m i / N),$$

$$i = -n, \dots, 0, 1, \dots, n-1. \quad (2)$$

Суммы (1) и (2) находятся при помощи быстрого преобразования Фурье (БПФ). Блок-схема алгоритма счета спектра Фурье с использованием БПФ представлена ниже (рис. 1)¹. Идея алгоритма состоит в следующем [2]. На основе исходного массива x из N чисел формируются два массива $Z1$ и $Z2$ длиной M , где $M = 2^{m_0}$. Число m_0 подбирается так,

¹ Все блок-схемы в данной работе выполнены в обозначениях ГОСТ 19.002-80 и ГОСТ 19.003-80.



Р и с. 1. Блок-схема 1 алгоритма

чтобы $2^{m_0 - 1} < N \leq 2^{m_0}$; таким образом, длина ряда $Z1$ и $Z2$ есть целая степень числа 2. Ряд $Z1$ получается в результате дополнения исходного массива нулями до полной длины ряда M , ряд $Z2$ полностью состоит из нулей. Далее, после предварительного расчета массива $CS(k) = \cos(2\pi k/M)$, $k = 0, 1, \dots, M/4$, производится обращение к процедуре БПФ (версия с прореживанием по времени [3]), на выходе которой имеем комплексный спектр. Действительная часть спектра записывается в массив $Z1$, мнимая — в массиве $Z2$. Поскольку исходный процесс — вещественный, то его спектр обладает свойством комплексно-сопряженной симметрии. Поэтому достаточно сосчитать фазовый и амплитудный спектры только для неотрицательных частот $0 \leq f < f_H$ ($f_H = 1/2\Delta t$ — частота Найквиста), записав их последовательно в один массив $Z2$:

$$\varphi_m = \arctg \frac{Z2(m)}{Z1(m)}, |X_m| = \sqrt{Z1^2(m) + Z2^2(m)},$$

$$Z2(m) = \varphi_m, Z2(m + M/2) = |X_m|, m = 1, 2, \dots, M/2,$$

где m — номер гармоники, соответствующий частоте $f_m = m - 1/M\Delta t$.

Для коррекции спектра "за прибор" по известной формуле из [4] рассчитываются фазовая и амплитудная частотные характеристики сейсмографа, массивы которых длиной $M/2$ записываются последовательно в $Z1$, после того как спектр исходного процесса рассчитан:

$$Z1(m) = \psi_m, Z1(m + M/2) = U_m, m = 1, 2, \dots, M/2,$$

где ψ_m и U_m — фазовый сдвиг и амплитудное увеличение сейсмографа на частоте $f_m = (m - 1)/M\Delta t$. Спектры, исправленные "за прибор", будем отмечать индексом 0:

$$\varphi_m^0 = \varphi_m - \psi_m, |X_m^0| = \frac{|X_m|}{U_m U_0},$$



Р и с. 1 (окончание)

или

$$Z2(m) = Z2(m) - Z1(m), Z2\left(m + \frac{M}{2}\right) = \frac{Z2(m + M/2)}{U_2 Z1(m + M/2)},$$

$$m = 1, 2, \dots, M/2,$$

где U_0 – постоянное увеличение сейсмографа.

Так как исходный микросейсмический процесс можно считать бесконечным стационарным случайным процессом, для оценки его спектра необходимо рассматривать выборочную спектральную плотность [1]:

$$C_{xx, m} = M\Delta t |X_m|^2, m = 1, 2, \dots, M/2,$$



Рис. 2. Блок-схема 2 алгоритма сглаживания

сглаженную каким-либо способом. В данной работе применена процедура сглаживания, предложенная Ю.Ф. Копничевым и др. [5], и заключающаяся в следующем: сначала с помощью БПФ находится комплексный спектр от логарифма спектра исходного процесса, который затем пропускается через прямоугольный низкочастотный фильтр с параметром фильтрации g_0 ($2\Delta t \leq g_0 \leq M\Delta t/2$). Чем меньше g_0 , тем сильнее сглаживание. Обратным БПФ находим логарифм сглаженного спектра исходного процесса.

Для сглаживания (блок-схема 2, рис. 2) в программе используются прежние массивы $Z1$ и $Z2$: сначала в массив $Z1$ записывается ряд

$$\lg(C_{xx, m}), \quad m = 1, 2, \dots, M/2 \quad (3)$$

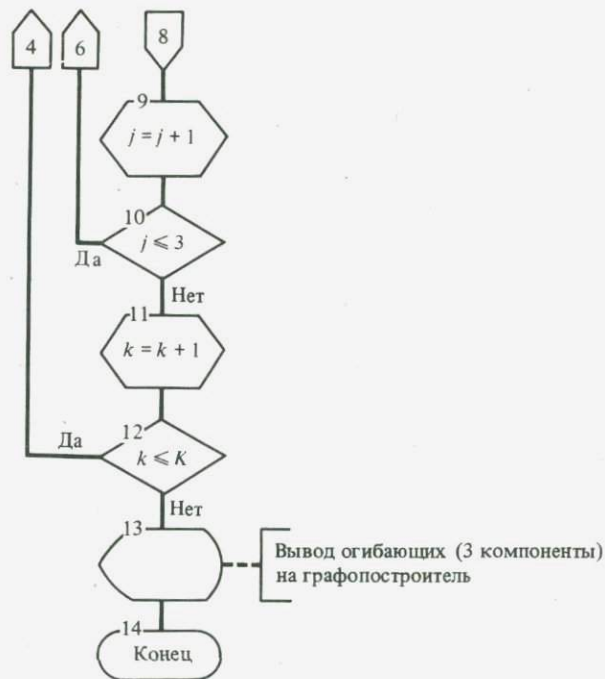
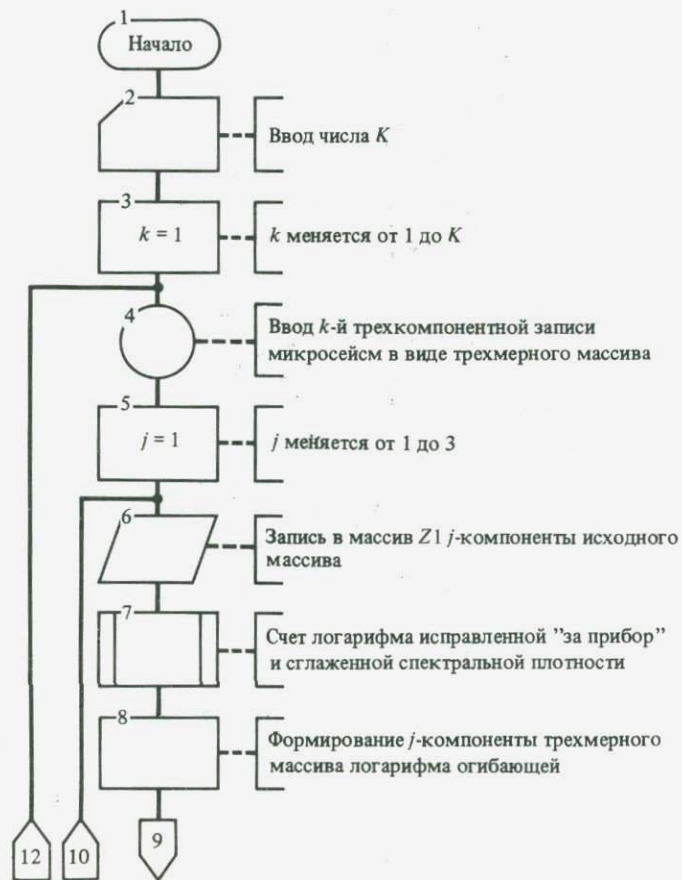
(соответственно в массив $Z2$ записываются нули). После обращения к БПФ в массиве $Z1$ имеем, как и раньше, действительную, а в массиве $Z2$ — мнимую часть спектра ряда (3) и фильтрация сводится к приравниванию нулю части массивов $Z1$ и $Z2$:

$$Z1(i) = Z2(i) = 0, \quad n_0 < i \leq M/2 - n_0,$$

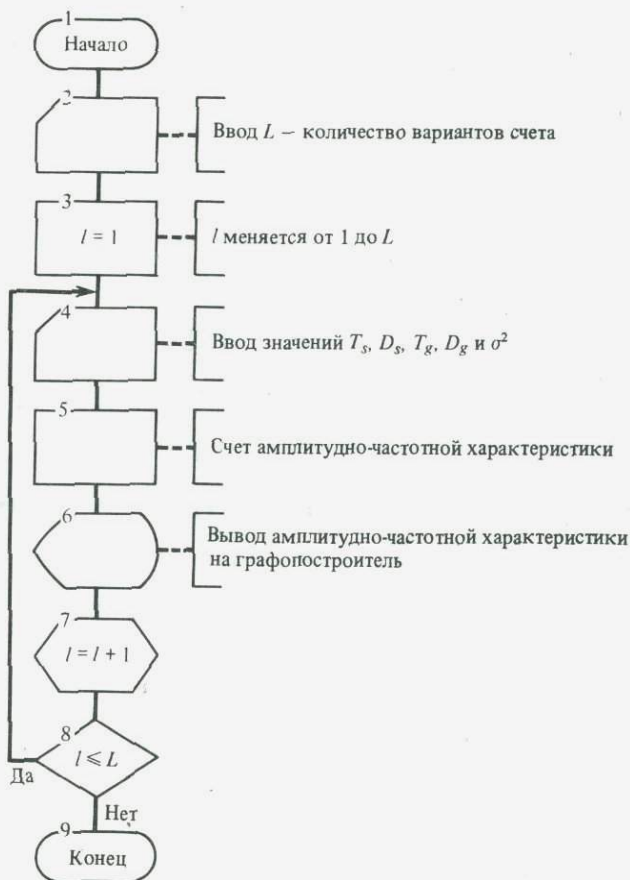
где $n_0 = [g_0/2\Delta t]$. После обратного БПФ в массиве $Z1$ имеем сглаженный спектр исходного процесса:

$$\lg(\bar{C}_{xx, m}) = Z1(m), \quad m = 1, 2, \dots, M/2.$$

Определим огибающую K спектров записей микросейсм одинаковой длины $T = N\Delta t$ как $C_{xx, m}^{00} = \max_k \{\bar{C}_{xx, m}^{ok}\}$; $m = 1, 2, \dots, M/2$; $k = 1, 2, \dots, K$.



Р и с. 3. Блок-схема 3 программы



Р и с. 4. Блок-схема 4 программы

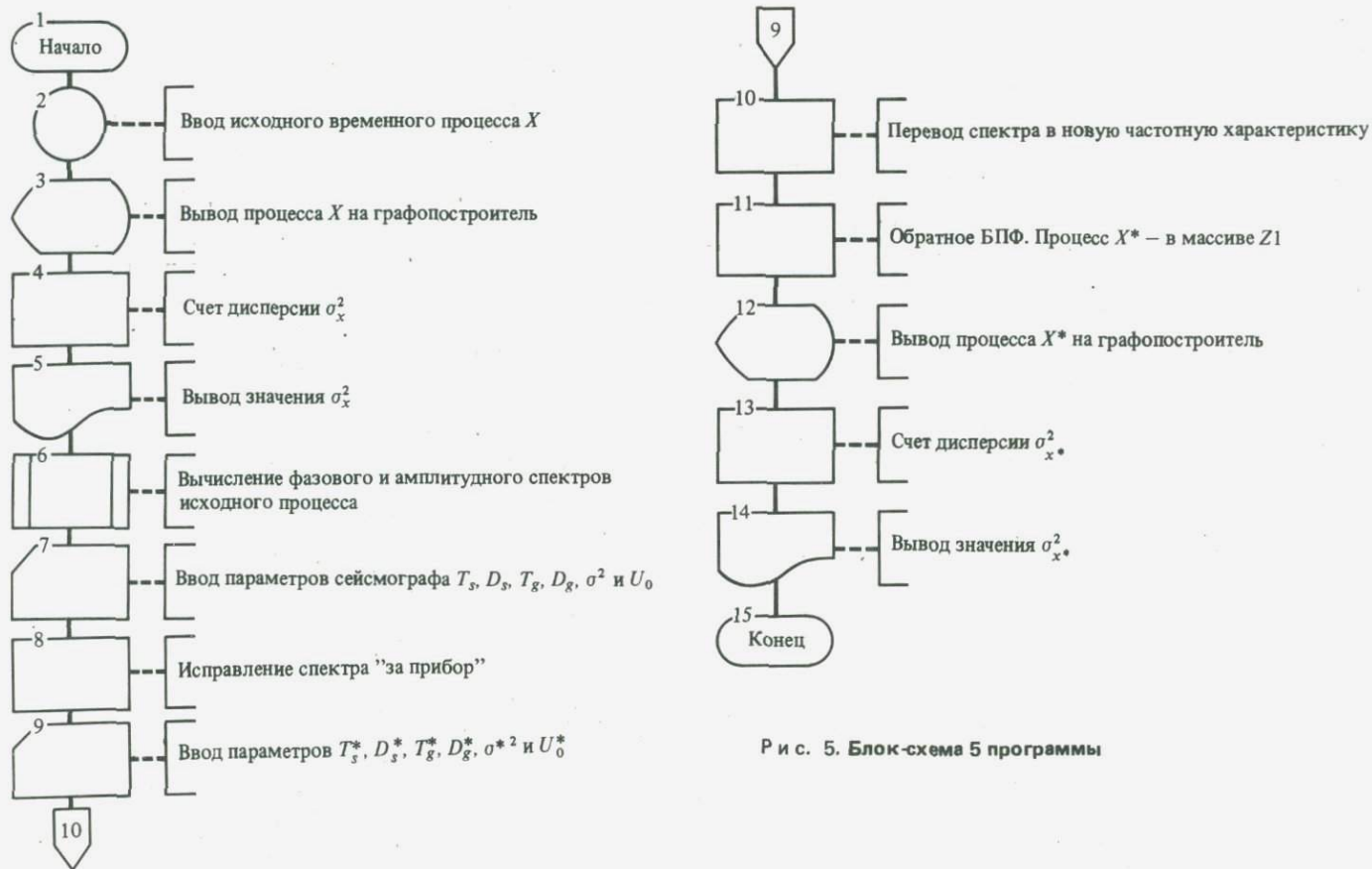
При достаточно представительной исходной выборке записей микро-сейсм эта огибающая дает форму спектрального окна помех для данного сейсмографа. Рекомендуется строить отдельно огибающую спектров вертикальных и горизонтальных компонент (блок-схема 3, рис. 3).

Из теоремы Парсеваля [1] следует, что частотная характеристика, подавляющая помехи до необходимого уровня, удовлетворяет неравенству:

$$\frac{2}{M\Delta t} \sum_{m=1}^{M/2} \bar{C}_{xx, m}^{00} U_0^{*2} U_m^{*2} \leq \sigma_0^2, \quad (4)$$

где $\sigma_0^2 = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N x_i^2$ — дисперсия записи микросейсм максимального допусти-

мого уровня на сейсмограмме. Для наиболее полной регистрации сигнала в данных микросейсмических условиях необходимо максимальное увеличение и максимально возможная ширина полосы пропускания сейсмографа (в пределах выбранного заранее интервала частот в соответствии



Р и с. 5. Блок-схема 5 программы

с рекомендациями в [6]). Поэтому условие (4) переходит в требование

$$\min \left\{ \sum_{m=1}^{M/2} \left(C_{xx, m}^{00} U_m^{*2} - \frac{\sigma_0^2 \Delta t}{U_0^{*2}} \right) \right\}. \quad (5)$$

Отсюда следует, что в интересующем нас диапазоне частот кривые $U^*(f)$ и $[\bar{C}_{xx}^{00}(f)]^{-1/2}$, изображенные в логарифмическом масштабе, должны по форме минимально отличаться друг от друга. Это дает возможность найти оптимальную форму амплитудно-частотной характеристики графическим путем, а затем перебором, используя программу DEVICE (блок-схема 4, рис. 4). Установить соответствующие этой характеристике значения параметров T_s^* , D_s^* , T_g^* , D_g^* и σ^{*2} .

Так как для выбора значения параметра сглаживания g_0 при построении огибающей спектров помех нет достаточно жесткого критерия [1,5], то при подборе формы частотной характеристики $U^*(f)$ существует некоторый произвол. Поэтому необходим контроль оптимальности найденной частотной характеристики, осуществляемый пересчетом в нее всех имеющихся записей микросейсм по формуле

$$X_i^* = \sum_{m=-n}^{n-1} X_m \frac{U_0^* U_m^*}{U_0 U_m} \exp(j 2 \pi m i / N + \psi_m^* - \psi_m),$$

$$i = -n, \dots, 0, 1, \dots, n-1.$$

где X_m определяется из (1). Эта процедура (блок-схема 5, рис. 5) корректна, если полосы пропускания характеристик $U(f)$ и $U^*(f)$ близки или полоса пропускания $U(f)$ шире полосы пропускания $U^*(f)$, что должно выполняться по смыслу постановки задачи.

После пересчета записей микросейсм в новую частотную характеристику окончательно устанавливается, исходя из величины допустимого уровня помех на сейсмограмме, значение постоянного увеличения U_0^* . Пересчет же записей землетрясений позволяет найти, насколько увеличится отношение сигнал/шум, определяемое как $\gamma = \sigma_c / \sigma_m$, где σ_c и σ_m — стандартные отклонения полезного сигнала и микросейсм соответственно.

Изложенный метод был опробован для оптимизации частотной характеристики прибора СКМ-3 станцией Южно-Сахалинск. При этом было достигнуто увеличение отношения сигнал/шум в среднем в 1,5 раза. В дальнейшем описанный комплекс программ позволит выполнить работу по оптимизации частотных характеристик сейсмографов и для других сейсмических станций Дальнего Востока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1971. вып. 1. 316 с.
2. Курьянов Б.Ф., Медведева Л.Е. Гармонический анализ стационарных случайных процессов (с использованием быстрого преобразования Фурье). — В кн.: Статистика и стохастические системы. М.: Наука, 1970, вып. 8. 63 с.
3. Коутс Р. Методы преобразования Фурье. — В кн.: Введение в цифровую фильтрацию. М.: Мир, 1976, с. 99—148.
4. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР/Под ред. З.И. Арановича. М.: Наука 1974. 243 с.
5. Копничев Ю.Ф., Нерсесов И.Л. Результаты расчета сильного движения: моделирование акселерограмм Газлийского и Алайского землетрясений. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1981, № 9, с. 15—29.
6. Кондорская Н.В., Аранович З.И. Методологические основы оптимизации систем сейсмических наблюдений. — Изв. АН СССР. Физика Земли, 1971, № 7, с. 14—30.

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ ТОЧНЫХ СИНТЕТИЧЕСКИХ СЕЙСМОГРАММ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ДИПОЛЬНОГО ИСТОЧНИКА

А.Г. Епифанский

В сейсмологической практике важную роль играет правильная интерпретация сейсмограмм. В этом вопросе существенную помощь оказывают теоретические сейсмограммы.

В работе рассмотрена программная реализация построения теоретических сейсмограмм для однородного слоистого полупространства при заглубленном дипольном источнике. Формулы для нахождения вектора смещения в указанной модели приведены в работе [1]. Решение записано во временной области в виде разложения по парциальным волнам. Такое разложение позволяет проанализировать вклад каждой парциальной волны в суммарную сейсмограмму, что важно для анализа точности при определении вступлений сейсмических волн от локальных землетрясений.

Работа содержит постановку задачи, что позволяет не обращаться без необходимости к [1]. Приведенные алгоритмы построения множества всех кинематически возможных парциальных волн могут иметь самостоятельное значение в задачах гипоцентрии для расчета времен вступлений основных сейсмических волн.

1. *Постановка задачи.* Рассмотрим изотропную линейно-упругую среду, заполняющую в декартовой системе координат полупространство $x_3 > 0$. Пусть среда состоит из N однородных слоев, разделенных плоскопараллельными границами, и подстилающего полупространства. Обозначим через λ_m , μ_m , ρ_m и h_m упругие постоянные Ламе, плотность и толщину слоя m ($m = 1, \dots, N + 1$). Номер $m = N + 1$ относится к подстилающему пространству ($h_{N+1} = \infty$).

Требуется определить поле смещений $u(t, x)$, возбужденное действием расположенного на глубине $H > 0$ сосредоточенного источника, описываемого симметричным тензором $M_{rs} = M_{rs}^0 f(t)$ (M_{rs}^0 — тензор сейсмического момента). Временная функция $f(t)$ удовлетворяет следующему условию:

$$f(t) = 0 \text{ при } t \leq 0.$$

Обозначим через $u_i^{(m)}$ i -ю компоненту вектора смещения $u^{(m)}$ в слое m . Будем считать, что до момента $t = 0$ среда находится в покое:

$$u_i^{(m)} = \dot{u}_i^{(m)} = 0, \quad m = 1, \dots, N + 1. \quad (2)$$

Здесь и всюду далее латинские индексы принимают значения 1, 2, 3, если множество значений не указано явно. По повторяющимся в выражении индексам, как обычно, подразумевается суммирование.

Введем обозначения для координат кровли слоя $m+1$:

$$H_{m+1} = \sum_{k=1}^m h_k, \quad m = 1, \dots, N,$$

причем, очевидно, $H_1 = 0$.

Пусть n — номер слоя, в котором расположен источник, тогда

$$\sum_{k=1}^{n-1} h_k < H \leq \sum_{k=1}^n h_k.$$

Уравнения движения в слое $m \neq n$ имеют вид

$$\sigma_{ik, k}^{(m)} = \rho_m \ddot{u}_i^{(m)}, \quad m = 1, \dots, N+1, \quad m \neq n, \quad (3)$$

$$H_m < X_3 < H_{m+1}; \quad m \leq N, \quad \text{или} \quad X_3 > H_{N+1}, \quad \text{если} \quad m = N+1,$$

где запятая в индексах означает дифференцирование по соответствующей координате; $\sigma_{ik}^{(m)}$ — компоненты тензора напряжений в слое m :

$$\sigma_{ik}^{(m)} = \lambda_m \delta_{ik} u_{j, j}^{(m)} + \mu_m (u_{i, k} + u_{k, i}), \quad m = 1, \dots, N+1. \quad (4)$$

В слое n , где расположен источник, уравнения движения имеют вид

$$\sigma_{ik, k} + \rho_n f_i = \rho_n \ddot{u}_i^{(n)}, \quad (5)$$

где f_i — соответствующее дипольному источнику распределения массовых сил:

$$f_i = \frac{f(t)}{2\rho_n} M_{rs}^0 \left[\delta_{ir} \frac{\partial \delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}^0)}{\partial X_s} + \delta_{is} \frac{\partial \delta(\mathbf{X} - \mathbf{X}^0)}{\partial X_r} \right], \quad (6)$$

$\delta(\mathbf{X}) = \delta(X_1) \delta(X_2) \delta(X_3)$ — пространственная дельта-функция Дирака, $\mathbf{X}^0 = (0, 0, H)$.

Считается, что слои находятся в идеальном контакте: на границах непрерывны вектор смещений и компоненты тензора напряжений G_{i3} :

$$u_i^{(m)} = u_i^{(m+1)}; \quad \sigma_{i3}^{(m+1)}; \quad X_3 = H_{m+1}, \quad m = 1, \dots, N, \quad (7)$$

а граница $x_3 = 0$ свободна от напряжений:

$$\sigma_{i3}^{(1)} = 0. \quad (8)$$

2. Метод решения. К решению сформулированной в первом параграфе задаче существует несколько подходов. По терминологии работы [2], их можно разделить на четыре основных: метод Лэмба [3], метод функционально-инвариантных решений Смирнова—Соболева [4], метод Каньяра—Хупа [5, 6], метод контурных интегралов. Во всех случаях решение задачи о сосредоточенном импульсном воздействии в трехмерной среде записывается в виде интеграла. Особенности, присущие различным представлениям решения, важны в приложениях для конкретных физических результатов.

В данной работе используется полученное в работе [1] решение во временном представлении. Это позволяет выделять элементарные волны и следить за их распространением. Число этих волн при распространении возмущения в многослойной среде неограниченно растет со временем. Но в каждой фиксированный момент времени в формировании волнового поля участвует конечное число элементарных волн.

Предположим, что имеется K таких волн. Тогда, согласно [1], решение задачи можно записать в виде следующего разложения:

$$u_i(t, \mathbf{X}) = \int_0^t f(t-\tau) \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\sum_{k=0}^K G_i^{(k)}(\tau) \right] d\tau, \quad (9)$$

где $G_i^{(k)}(\tau)$ — функция времени, описывающая смещение в элементарной волне при сосредоточенном импульсном воздействии и представляемая

в виде интеграла в комплексной плоскости p :

$$G_i^{(k)}(t) = -\frac{1}{2\pi^2 r} \int_{C(t)} \frac{W_i^{(k)}(p) dp}{\sqrt{1 - \eta^2(p)/\rho^2}}, \quad (10)$$

r — эпицентрально расстояние, а функции $W_i^{(k)}(p)$ определяются из условия возбуждения и граничных условий. Выражения для $W_i^{(k)}(p)$ и $\eta(p)$ приведены в Приложении.

Контур интегрирования $C(t)$ параметрически зависит от времени и симметричен относительно мнимой оси, причем $Im p \geq 0$ при $p \in C$.

Обозначим через C^a и C^b начало и конец контура C , тогда, очевидно, имеем $Im C^a = Im C^b$, $Re C^a = -Re C^b$.

Эволюция контура C с ростом времени определяется радикалом, стоящим в знаменателе подынтегрального выражения в (10) [1]. Однако значение интеграла (10), как легко видеть, зависит только от положения концов контура C^a и C^b .

Рассмотрим поведение точек C^a и C^b в зависимости от времени. Как было показано в [1], до некоторого момента времени точки C^a и C^b лежат на действительной оси ($Im C^a = Im C^b = 0$). При $t > t^*$ C^a и C^b смещаются в верхнюю полуплоскость. График функции $C^a(t)$ при $t \geq 0$ называется "контуром Каньяра" (рис. 1). Графики функций $C^a(t)$ и $C^b(t)$ при $t \geq 0$ являются симметричными относительно мнимой оси.

Подынтегральная функция в (10) имеет на контуре C четную действительную и нечетную мнимую часть. Поэтому вместо (10) можно записать

$$G_i^{(k)} = \frac{1}{\pi^2 r} Re \int_{C'} \frac{W_i^{(k)}(p) dp}{\sqrt{1 - \eta^2/p^2}}, \quad (11)$$

где контур интегрирования C' есть правая половина C , проходимая в обратном направлении.

Выражения для $W_i^{(k)}$ содержат радикалы вида

$$\sqrt{1/v_j^2 - p^2}, \quad (12)$$

где v_j есть скорость распространения возмущения в слое: $1 \leq j \leq 2N+2$. Радикалы (12) содержит и функция $\eta(p)$. Важное отличие состоит в следующем. В $\eta(p)$ входят радикалы, содержащие только скорости распространения возмущений в каждом пересекаемом слое. Функции $W_i^{(k)}$ имеют радикалы, содержащие скорости как продольных, так и поперечных волн в пересекаемом возмущенном слое и в соседних слоях. Таким образом, часть скоростей входит в выражения для $W_i^{(k)}(p)$ и не содержится в $\eta(p)$ (скорости входят в выражения для этих функций только в радикалах (12)). Обозначим через \underline{V} множество скоростей, входящих в выражения для $W_i^{(k)}(p)$, а через \tilde{V} — множество скоростей из $\eta(p)$. Очевидно, $\tilde{V} \subset \underline{V}$. Пусть $v_{\max} = \max_{v \in \underline{V}} \{v\}$ и $\tilde{v}_{\max} = \max_{v \in \tilde{V}} \{v\}$. Из

точек ветвления радикалов ($\pm 1/v \mid v \in \underline{V}$) проведем разрезы вдоль действительной оси на бесконечность.

Возможны два случая: $\tilde{v}_{\max} < v_{\max}$ и $\tilde{v}_{\max} = v_{\max}$. Если $\tilde{v}_{\max} < v_{\max}$, то может оказаться, что $C^a(t^*) > 1/v_{\max}$. Это означает, что есть такое t^* , для которого $C^a(t^*) = 1/v_{\max}$.

Очевидно, контур интегрирования в (11) можно положить на действи-

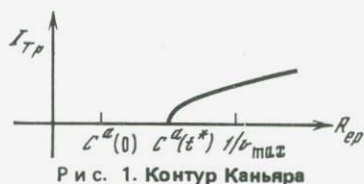


Рис. 1. Контур Каньяра

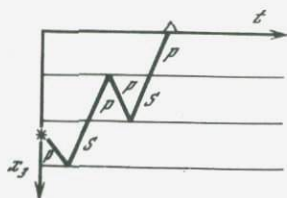


Рис. 2. Пример вертикального годографа

тельную ось сверху на отрезке $[0, C^a(t^*)]$. При $\tilde{v}_{\max} < v_{\max}$ точку $1/v_{\max}$ следует обойти сверху, так же как и все другие точки ветвления, для которых $1/v < C(t^*)$. Участок контура от $C^a(t^*)$ до $C^a(t)$, $t > t^*$, проведем в комплексной плоскости. Более подробно положение контура разбирается дальше. Заметим лишь, что на участке $[0, C^a(t^*)]$ контур теперь совпадает с контуром Каньяра.

Нетрудно видеть, что значение интеграла (11) равно нулю, если контур C полностью лежит на действительной оси, а это может быть только для $t < \min(t', t^*)$ (значение подынтегральной функции на действительной оси — величина чисто мнимая). Моменту t^* , когда $C^a(t)$ смещается с действительной оси, соответствует вступление объемной волны. Но возможен случай, когда $t' < t^*$, тогда перед объемной волной появляется вступление головной волны. Вступление волны связано с тем, что радикал $\sqrt{1/v_{\max}^2 - p^2}$ при $p > 1/v_{\max}$ становится мнимым ($p \in C$). Заметим, что указанный радикал входит в один из коэффициентов отражения-преломления, что и характерно для появления головной волны. Очевидно, при $\tilde{v}_{\max} = v_{\max}$ головной волны перед вступлением объемной нет.

3. Упорядочение волнового поля. Приведенное в предыдущем параграфе представление (9) волнового поля удобно тем, что позволяет изучать вклад в общее поле смещений отдельно для каждой элементарной волны. Ранее предполагалось, что элементарные волны как-то пронумерованы. В данном параграфе описываются "пронумеровочные" процедуры, позволяющие построить упорядоченное множество индексов, между элементами которого и элементарными (парциальными) волнами установлено взаимнооднозначное соответствие. Фактически эти процедуры описывают последовательность разложения волнового поля на парциальные волны.

Отметим, что приводимые в литературе описания упорядочивания разложения волнового поля, как правило, в итоге ограничиваются рассмотрением кратных волн (без учета обменов $P \leftrightarrow S$) и подсчетом их числа [9]. Использование индексации волн в виде, близком к принятому в данной работе, встречается в [7, 8]. Описание же процедуры построения множества индексов отсутствует.

Рассмотрим процедуру разложения волнового поля на парциальные волны.

Парциальной волной будем называть возмущение, для которого в каждом слое можно указать скорость распространения (v_P или v_S); в каждом слое можно указать направление распространения в проекции на вертикаль (ось X_3).

Отметим, что поперечное возмущение типа SH при взаимодействии с горизонтальными границами не порождает продольных волн. Поэтому для волны SH достаточно указать только направление. По кинематике, т.е. по времени распространения, волна SH совпадает с волной SV .

В плоскости X_3, t каждую парциальную волну можно изобразить в виде ломаной линии (вертикальный годограф) с указанием на каждом звене индекса, соответствующего скорости (рис. 2). Такая ломаная линия, очевидно, может быть описана индексом, который представляет упорядоченную последовательность пар чисел (α, β) :

$$I = \{ (\alpha_0, \beta_0), \dots, (\alpha_J, \beta_J) \}, \quad (13)$$

где $\alpha_j = \begin{cases} 0 & \text{для возмущения типа } P \\ 1 & \text{для возмущения типа } S; \end{cases}$

$\beta_j = \begin{cases} 0 & \text{— направление распространения вверх} \\ 1 & \text{— направление распространения вниз;} \end{cases}$

J — число пересекаемых возмущением слоев; α_0, β_0 — относятся к возмущению, распространяющемуся из источника до первого взаимодействия с границей.

Индекс в виде (13) описывает любую из парциальных волн при произвольном взаимном расположении источника и приемника. Однако с точки зрения приложений наибольший интерес представляет случай, когда источник погружен в среду, а приемник расположен на свободной поверхности, что в дальнейшем и будем предполагать. Распространение процедуры на случай произвольного расположения приемника в среде принципиальных трудностей не вызывает.

Запишем индекс (13) в другом представлении:

$$I = \{ P(J), D(J) \}, \quad (14)$$

где $P = \alpha_0, \dots, \alpha_J$ и $D = \beta_0, \dots, \beta_J$. Назовем P и D в (14) фазовой и директивной частями индекса соответственно. Легко видеть из (13) и (14), что P и D представляют из себя двоичные числа, значения которых лежат в пределах $0 \div (2^{J+1} - 1)$. Для удобства нумерация битов начинается со старшего (бит 0) и оканчивается младшим (бит J).

Фазовая и директивная части индекса могут принимать не все значения из указанного диапазона. Ограничения связаны с условием возможности наблюдения данной парциальной волны в точке расположения приемника и в заданном временном интервале. Условие прихода парциальной волны в точку наблюдения можно записать в виде равенства

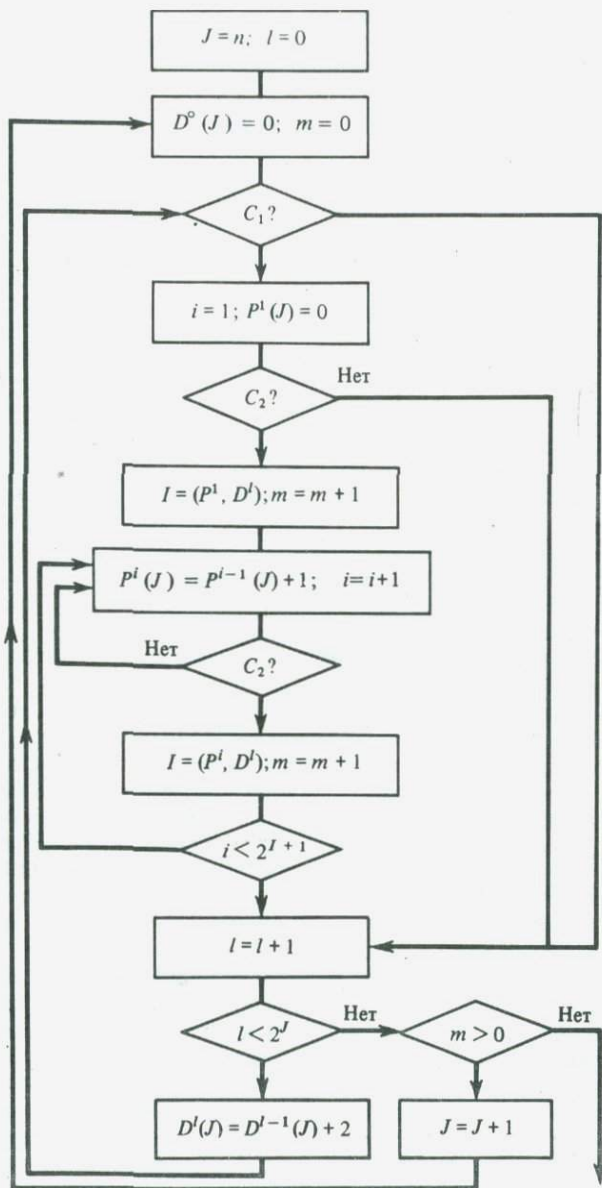
$$n = [J - (\beta_0 + 2 \sum_{j=1}^J \beta_j) + 3/2], \quad (15)$$

где n — номер слоя с источником.

Сформулируем первую из процедур построения упорядоченного множества индексов. Характерным параметром в данной процедуре является число взаимодействий с границами. Очевидно, что при расположении приемника на свободной поверхности минимальное число границ на пути распространения возмущения равно n . Будем обозначать через $P(J)$ и $D(J)$ двоичные числа, соответствующие фазовой и директивной частям индекса, имеющие $J + 1$ бит.

На рис. 3 приведена блок-схема рассматриваемой процедуры.

Процедура достаточно проста и позволяет получить индексы всех парциальных волн. Группирование осуществляется по длине индекса. Такое группирование не всегда удобно, так как одинаковую длину индекса имеют волны с различным числом отражений. Кроме того, описанная процедура затрудняет построение эффективного "отсекания", т.е. решающего



Р и с. 3. Блок-схема первой процедуры перебора парциальных волн

C_1 — проверка выполнения равенства (15); C_2 — проверка условия, что время прихода волны в точку приема находится в заданном интервале

правило, по которому прекращается перебор группы индексов в связи с большим запаздыванием или исчезающей амплитудой.

Возможно построение аналогичной процедуры, но имеющей другой параметр группирования.

Для иллюстрации рассмотрим следующий пример (рис. 4). Пусть среда состоит из трех слоев, как показано на рисунке. Построим вертикальные годографы волн (отмечены на рисунке номерами 1, 2, 3 и 4, 5). Индекс волны 4 получается, если удлинить на два шага индекс волны 2. Очевидно, вступление волн типа 4 отстает от волн 2, а их амплитуда меньше, чем амплитуда волн 2. Заметим, что волны 3 и 4 имеют одинаковые по длине индексы и отличаются числом отражений, в то время как волны 2 и 3 имеют различную длину индексов, но одинаковое число отражений. В приложениях часто представляют интерес именно волны типа 1, 2 и 3. Эти волны, последовательно выходя в первые вступления, формируют годограф.

Отличительной характеристикой волн 1, 2, 3 является то, что они имеют минимально необходимое число отражений для прихода на свободную поверхность в точку наблюдения. Удобно сгруппировать индексы волн по параметру, получаемому от целого деления числа отражений на 2. При этом окажется, что волны 1, 2, 3 составят группу, соответствующую значению параметра равного 0. Следующую группу при значении параметра 1 составят индексы волн, полученные увеличением на 2, длины индексов волн со значением параметра группирования 0. Так, например, волна 4 отнесется ко второй группе. Этот параметр назовем кратностью. Группу волн, характеризуемую значением кратности, равным 0, — группой прямых и однократно отраженных волн.

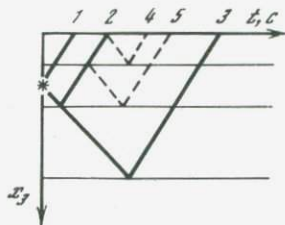
Как показано на рис. 4, индекс волны 4 получается из индекса волны 2. Для построения всего множества индексов можно на каждом шаге использовать уже созданное на предыдущих шагах его подмножество. Такая рекурсивная процедура оказывается более удобной и имеет более простое правило "отсекания". Действительно, пусть на некотором шаге оказалось, что какая-либо парциальная волна имеет время вступления за пределами рассматриваемого интервала, тогда ее амплитуда исчезающе мала. Любая ею порожденная на следующем шаге волна тоже будет иметь время вступления за пределами интервала, а ее амплитуда, естественно, не может быть больше, чем у предыдущей волны.

Вторая процедура построения множества индексов построена на использовании уже существующего подмножества индексов как базового. При этом на каждом шаге строятся индексы волн, имеющие одно и то же значение параметра $[k/2]$, где k — число отражений волны внутри среды, названный здесь кратностью волны. Эта процедура рекурсивная. В качестве первого базового набора берется множество прямых и однократно отраженных волн. Легко определить, что число этих волн (прямых и однократно отраженных) равно $N + 2 - n$, где N — число слоев (без полупространства), n — номер слоя расположения источника. Длина индексов этих волн будет принимать последовательно следующий ряд значений: $n - 1, n, n + 2, \dots, 2N - (n + 1)$. Но прежде чем рассматривать саму процедуру перебора, сделаем несколько замечаний относительно структуры директивной части индекса.

Эту часть удобно представить в виде

$$D(j) = d(j)2^{j-1} + b(j-j), \quad (16)$$

где $d(j)$ и $b(j-j)$ — двоичные числа длиной j и $J-j$ бит соответст-



Р и с. 4. Вертикальные годографы для прямых и однократно отраженных волн (сплошная линия) и многократно отраженных (пунктирная линия)

венно, $d(j) = \beta_0, \dots, \beta_j$, $b(J-j) = \beta_{j+1}, \dots, \beta_J$, удовлетворяющие следующим условиям: номер j наименьший, для которого $b(J-j) = 0$ есть такой номер $j'' \leq j$, что среди $\beta_0, \dots, \beta_{j''}$ есть хотя бы один элемент, равный нулю. Очевидно, разбиение (16) единственно, а при условии $J \geq 1$ оба числа $d(j)$ и $b(J-j)$ имеют ненулевую длину ($D(0) = d(0) = \beta_0$), кроме того, поскольку $b(J-j) = 0$, запись $D(J) = d(j)2^{J-j}$ равносильна (16). Директивные части индексов прямых волн имеют вид $D(J) = 0$, $J = n-1$, а однократно отраженных $D(J) = (2^{m+1} - 1)2^{J-m}$, где $m = [(J-n)/2]$, $J \geq n$.

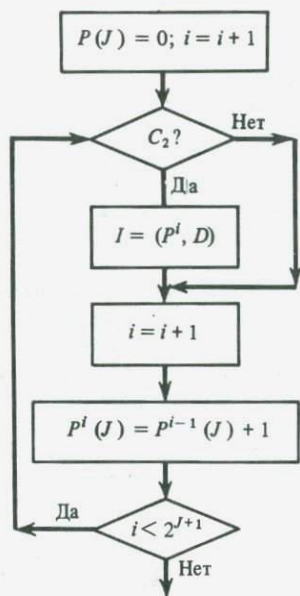
Процедура построения фазовых частей в группе прямых и однократно отраженных волн представлена блок-схемой на рис. 5. Процедура построения подмножества индексов для волн кратности $k = 1, 2, \dots$ состоит из двух частей: 1) построение подмножества директивных частей кратности $(k+1)$ и 2) перебор фазовых частей для каждой вновь полученной допустимой директивной части. Блок-схема процедуры построения директивных частей приведена на рис. 6.

Заметим, что равенство (15) определяет количество единичных битов в числе $d(j)$ из представления (16) директивной части. Тогда увеличение длины директивной части на 2 при переходе к новому значению параметра кратности $(k+1)$ приводит к необходимости увеличить число единичных битов в $D(J+2)$ на 1 по сравнению с $D(J)$ (здесь предполагается, что процедура переводит $D(J) \Rightarrow D(J+2)$). Очевидно, этот новый единичный бит может быть расположен в $b(J+2-j)$, т.е. уже $b(J+2-j) \neq 0$. Таким образом, из сказанного следует, что изменяется при переходе $D(J) \Rightarrow D(J+2)$ только $b(J+2-j)$, т.е. бывшая нулевой частью числа $D(J)$ согласно представления (16), увеличенная на 2 бита по длине.

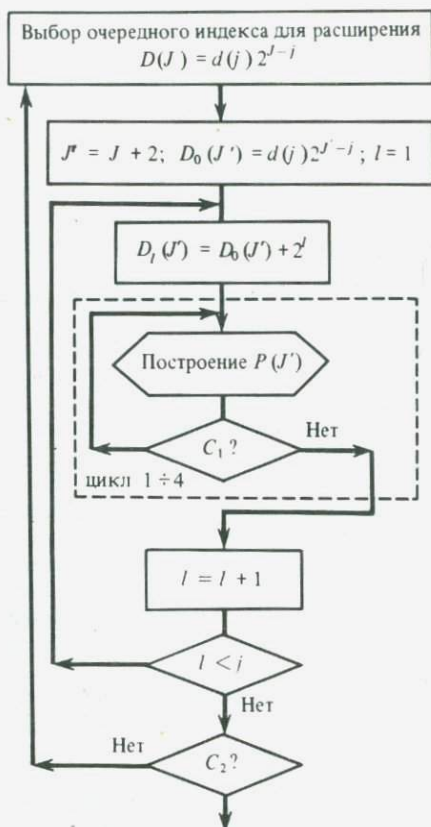
Покажем, что подмножества индексов, имеющие различные значения параметров группирования, не пересекаются и применение описанной процедуры не дает совпадения индексов внутри группы с одним значением параметра кратности.

В группе прямых и однократно отраженных волн все индексы имеют различную длину. На следующем этапе уже появится несколько индексов одинаковой длины. Очевидно, это будут индексы, различающиеся директивными частями в представлении (16). Это означает, что для каждой такой подгруппы параметр j пробегает ряд значений от исходного значения до $J+2$. Отсюда видно, что и для любого значения параметра кратности все входящие в группу индексы одинаковой длины различаются директивными частями.

Пусть теперь два индекса одинаковой длины относятся к различным группам по кратности (k) и $(k+1)$. Тогда совпадение индексов при (k) и $(k+1)$ означало бы совпадение (k) и $(k+1)$ в представлении (16). А последнее не может быть, так как это потребовало бы совпадения $d^{(k)}(j')$ и $d^{(k+1)}(j')$, где $j' \leq j$, а d^0 соответствует директивной части индекса прямой или однократно отраженной волны.



Р и с. 5. Блок-схема построения фазовых частей индексов прямых и однократно отраженных волн



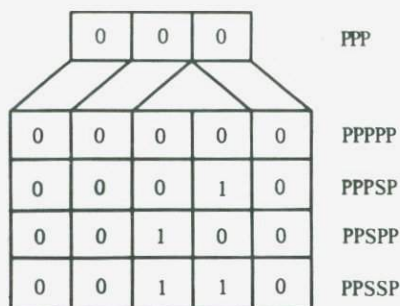
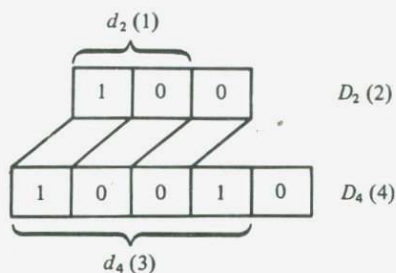
Р и с. 6. Блок-схема второй процедуры построения директивной части индексов парциальных волн

C_1 — проверка прихода волны в точку наблюдения в заданном временном интервале; C_2 — проверка построения индекса кратности $K + 1$

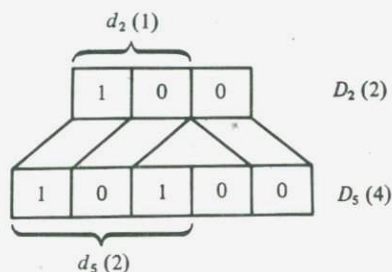
Для наглядности на рис. 7 представлены последовательные этапы формирования директивной части индекса волн 4 и 5 из 2 (рис. 4).

Перейдем к рассмотрению процедуры перебора фазовых частей индексов. На рис. 8 показана последовательная процедура формирования фазовой части индекса $P(J + 2)$ из уже построенной $P(J)$ при значении параметра кратности на единицу меньше текущего. Описать процедуру можно следующим образом.

Фазовая часть представлена двоичным числом и сдвигается на две позиции влево, начиная с бита номером, соответствующим $\beta_{j''} = 1$ в $(J + 2 - j)$; освободившиеся два бита заполняем нулями, получая фазовую часть со "вставкой" из волн PP ; прибавлением $2^{j''-1}$ мы получим "вставки" из волн PS , SP , SS соответственно; если окажется, что время вступления одной из указанных четырех волн не попадает в интервал наблюдения, то переходим к рассмотрению фазовой части, соответствующей следующей директивной части индекса.



Р и с. 7. Схема формирования директивных частей волн 4 и 5 из волны 2 (рис. 4)



Р и с. 8. Формирование фазовой части индекса парциальной волны для второй процедуры

При расчете динамики волн желательно, чтобы элементы индекса давали информацию о взаимодействии возмущения с границей, т.е. о направлении и типе возмущения в падающей и уходящей волнах, номере границы.

Введем модифицированный индекс. Элемент модифицированного индекса — это тройка чисел (α_j, β_j, m_j) , $j = 0, \dots, J$, где α_j — тип и направление в падающей волне; β_j — то же в уходящей волне; m_j — номер слоя;

$$\alpha_j, \beta_j = \begin{cases} \pm 1 & \text{для } P\text{-волны} \\ \pm 2 & \text{для } S\text{-волны} \\ \pm 3 & \text{для } SH\text{-волны.} \end{cases} \quad (17)$$

Для элемента (α_0, β_0, n) α_0 — тип и направление выходящего из источника возмущения; β_0 — тип приходящего к приемнику возмущения; n — номер слоя с источником. Естественно, среди элементов могут быть равные, тогда элемент будем записывать в виде

$$(\alpha_j, \beta_j, m_j)^{v_j}, \quad (18)$$

где $j = 1, \dots, J'$ и $J' < J$. Очевидно, $J' = J - \sum_{j=1}^J (v_j - 1)$. Сравнивая после-

довательно один вновь построенный индекс с ранее вычисленными (с заданными значениями кратности и длины), можно определить число совпадающих индексов. Пусть число таких индексов v_0 . Тогда все совпадающие по числу и кратности взаимодействий с границами индексы заменим на один:

$$\tilde{I} = (\alpha_0, \beta_0, n)^{v_0}, \dots, (\alpha_{J'}, \beta_{J'}, m_{J'})^{v_{J'}}; \quad (19)$$

Элементы модифицированного индекса упорядочены.

4. Вычисление времен вступления волн. Построение импульсной сейсмограммы требует определить момент вступления данной парциальной волны

в точке наблюдения. До этого момента интеграл (11) равен нулю в силу того, что подынтегральное выражение — величина чисто мнимая.

Рассмотрим процедуру вычисления времени вступления парциальной волны. Для этого сделаем несколько замечаний.

В подынтегральное выражение входят скорости $v_j, j = 0, \dots, J$ распространения возмущения в слое m_j и, кроме того, скорости $v'_j, j = 0, \dots, J-1$ распространения возмущения в слое $m'_j = m_j + (2\beta_j - 1)$, т.е. в смежном слое. Скорости v'_j входят только в выражение для $W_i^{(k)}$ в (11).

Ранее отмечалось, что до момента вступления объемной волны (t^*) контур интегрирования в (11) можно провести вдоль действительной оси. Момент t^* характеризуется тем, что уравнение $1 - \eta^2(\rho)/\rho^2 = 0$ имеет два совпадающих действительных корня. Легко видно, что эти корни совпадают с корнями уравнения $1 - \eta(\rho)/\rho = 0$, так как $\text{Re } \rho > 0$ на контуре C' .

Для нахождения t^* и $\rho^* = \rho(t^*)$ необходимо решить систему

$$\Phi(t, \rho) = 0, \quad \partial \Phi / \partial \rho = 0, \quad (20)$$

где

$$\Phi = t - \sum_{j=0}^J h_j \sqrt{1/v_j^2 - \rho^2} - \rho r.$$

Второе уравнение не зависит от t и поэтому легко может быть найдено решение (ρ^*), например, делением отрезка пополам, выбирая в качестве начального приближения отрезок $[0, \tilde{v}_{\max}^{-1}]$, где $\tilde{v}_{\max} = \max_{v \in \tilde{V}} \{ \tilde{v} \}$. Очевидно, $\rho^* < \tilde{v}_{\max}^{-1}$.

Рассмотренная процедура позволяет определить момент вступления заданной объемной парциальной волны. Однако до момента вступления объемной волны может вступать головная волна, порожденная взаимодействием данной объемной волны с одной из границ.

Пусть $\tilde{v}_{\max} = \max_{\tilde{v} \in V} \{ \tilde{v} \}$. Если $\rho^* > \tilde{v}_{\max}^{-1}$, то функция $W_i^{(k)}$ становится

комплексной, а все подынтегральное выражение при действительном $\rho > \tilde{v}_{\max}^{-1}$ будет иметь ненулевую действительную часть. Тем самым необходимо кроме t^* определить $t' = t(\rho')$, где $\rho' = \tilde{v}_{\max}^{-1}$, и взять меньшее из них за время вступления данной парциальной волны. Таким образом будет определен момент t_0 , начиная с которого должен вычисляться интеграл (11) при построении импульсной сейсмограммы. При $t < t_0$ смещение в импульсной сейсмограмме тождественно равно нулю.

5. *Выбор контура интегрирования.* Построение импульсной сейсмограммы парциальной волны связано с численным интегрированием (11). Этот интеграл имеет корневую особенность в точке $C^a(t)$ и в точках $\tilde{v}^{-1} < C^a(t^*)$, где $\tilde{v} \in V$. Контур интегрирования необходимо провести так, чтобы избежать интегрирования вблизи особенностей. Упорядочим $\tilde{v}_l \in V$ ($l = 1, \dots, L$), $\tilde{v}_L^{-1} < \text{Re } C^a(t)$ по убыванию значений $\tilde{v}_{l-1} > \tilde{v}_l$, и обозначим

$$\rho_l = \tilde{v}_l^{-1}, \quad \rho_{L+1} = C^a(t), \quad \rho_{l+1/2} = 0,5(\tilde{v}_{l+1}^{-1} + \tilde{v}_l^{-1}), \quad (21)$$

где $v_l \in V$ и $l = 1, \dots, L$. Тогда вместо (11) имеем

$$G_l^{(k)} = \frac{1}{\pi^2 r} \operatorname{Re} \sum_{l=1}^L \left\{ \int_{p_{l+1/2}}^{p_{l+1}} - \int_{p_{l+1/2}}^{p_l} \right\} \frac{W_l^{(k)} dp}{\sqrt{1-\eta^2/\rho^2}}. \quad (22)$$

Теперь интегралы в (22) имеют особенности на концах отрезков интегрирования.

6. Процедура численного вычисления несобственного интеграла. Каждый из интегралов в выражении (22) можно подстановкой $\rho = \rho_{l+1/2} + (\rho_l - \rho_{l+1/2})X$ привести к виду

$$J = \int_0^1 \frac{F(X) dX}{\sqrt{1-X}}, \quad (23)$$

где функция $F(X)$ ограничена на отрезке $[0, 1]$.

Рассмотрим последовательность b_k , $k = 0, 1, \dots$, такую, что $b_k = 1 - \alpha^k$, $0 < \alpha < 1$, причем $b_0 = 0$, $\lim_{k \rightarrow \infty} b_k = 1$.

Очевидно,

$$J = \sum_{k=1}^{\infty} I_k = \sum_{k=1}^{\infty} \int_{b_{k-1}}^{b_k} \frac{F(X) dX}{\sqrt{1-X}}.$$

Пусть

$$J_k = \int_{b_k}^1 \frac{F(X) dX}{\sqrt{1-X}}.$$

Так как $F(X)$ ограничена на отрезке $[b_k, 1]$, $k > 1$, то

$$F(X) = F(b_k) + O(X - b_k).$$

Тогда имеем

$$I_k = F(b_{k-1}) \int_{b_{k-1}}^{b_k} \frac{dX}{\sqrt{1-X}} = 2F(b_{k-1}) \sqrt{\alpha^{k-1}} (1 - \sqrt{\alpha}) \quad (24)$$

и соответственно

$$J_{k-1} = F(b_{k-1}) \int_{b_{k-1}}^1 \frac{dX}{\sqrt{1-X}} = 2F(b_{k-1}) \sqrt{\alpha^{k-1}}. \quad (24')$$

Из (24) и (24') найдем, что

$$I_k = J_{k-1} (1 - \sqrt{\alpha}). \quad (25)$$

Очевидно,

$$J = \sum_{i=1}^{k-1} I_i + J_{k-1}, \quad (26)$$

а кроме того,

$$J = \sum_{i=1}^k I_i + J_k. \quad (26')$$

Из (25) и (26), (26') легко найти формулу для аппроксимации исходного интеграла

$$J = \sum_{i=1}^{k-1} I_i + \frac{I_k}{1-\sqrt{\alpha}}, \quad (27)$$

которая позволяет вычислить значение интеграла на отрезке $[0, 1]$, не вычисляя подынтегральную функцию в точке $X = 1$.

Очевидно, что (27) дает необходимое значение интеграла, если функция $F(X)$ слабо меняется в сравнении с $\sqrt{1-X}$ при $X \rightarrow 1$. Для того чтобы определить номер итерации k в (27), заметим, что

$$\tilde{J}^{(k-1)} = \sum_{i=1}^{k-1} I_i + \frac{I_k}{1-\sqrt{\alpha}} \quad \text{и} \quad \tilde{J}^{(k)} = \sum_{i=1}^k I_i + \frac{I_{k+1}}{1-\sqrt{\alpha}},$$

где $\tilde{J}^{(k)}$ — аппроксимированное значение интеграла на k -й итерации.

Вычтя из второго выражения первое, получим $\Delta \tilde{J}^{(k)} = \frac{I_{k+1} - I_k}{1-\sqrt{\alpha}}$, и

если формула (27) точная, то $\Delta \tilde{J}^{(k)} = 0$.

Очевидно, что если $|\Delta \tilde{J}^{(k)}| < \epsilon$, где ϵ — требуемая точность, формула (27) становится справедлива и дает нам искомое значение несобственного интеграла.

Константа α должна быть выбрана опытным путем.

Вычисление I_k ведется по правилу Симпсона с удвоением числа шагов до достижения требуемой точности.

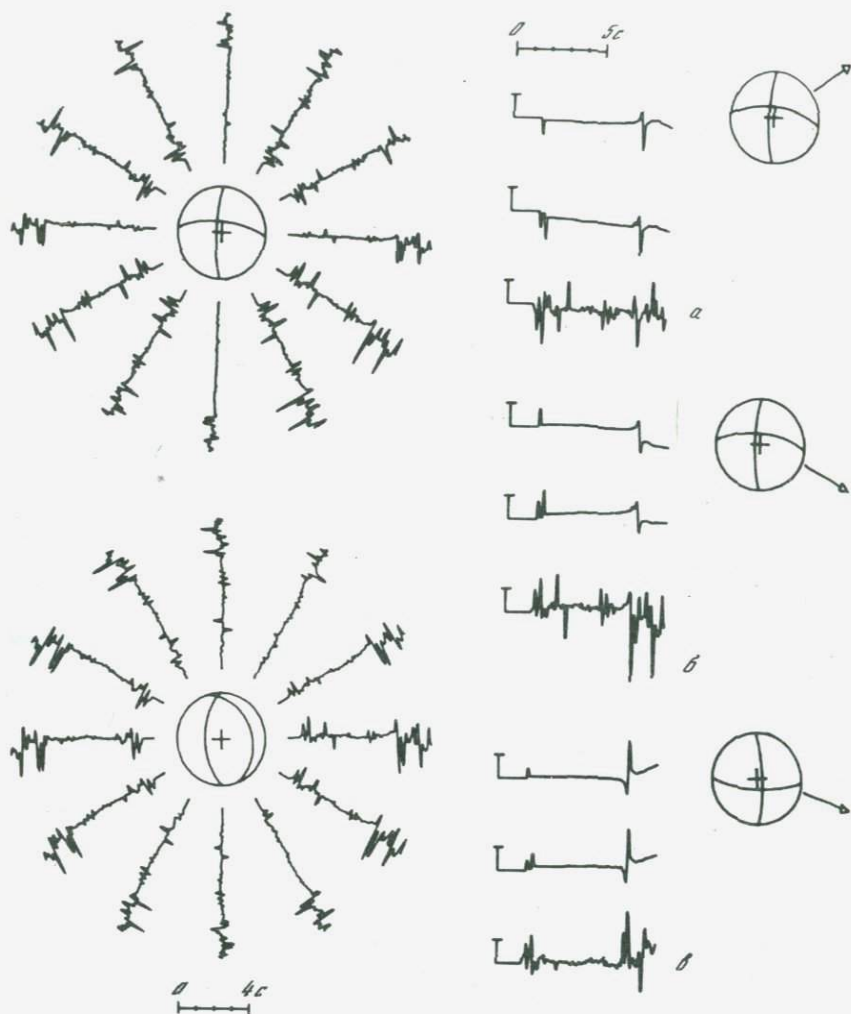
По описанным в данной работе алгоритмам построен комплекс программ, позволяющий рассчитать синтетическую сейсмограмму для заданных: эпицентрального расстояния, глубины очага, механизма движения в очаге и модели среды. Комплекс состоит из четырех программ.

1. Расчет индексов парциальных волн и времен их вступлений.
2. Расчет импульсных сейсмограмм парциальных волн.
3. Суммирование импульсных сейсмограмм парциальных волн и свертка с временной функцией источника.
4. Построение теоретических сейсмограмм при заданных углах наклона для вектора подвижки и азимутального угла.

Программы написаны на языке Фортран IV и имеют модуль на языке Макро для машин СМ-3, СМ-4. Использование машиннонезависимого языка позволило уплотнить промежуточные данные и ускорить процесс вычислений. Модули на Макро могут легко быть записаны на Фортране, что приведет к незначительному увеличению времени счета и объема промежуточных данных.

Рассмотрим пример расчета синтетических сейсмограмм. Сдвиговой источник имел следующую временную функцию:

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 0,5t, & 0 \leq t \leq 2\tau \\ 1, & t > 2\tau, \end{cases}$$



Р и с. 9. Синтетические сейсмограммы

Р и с. 10. Сравнение суммарной сейсмограммы с сейсмограммами прямых и обменных волн

где τ — шаг цифровки. Параметры модели среды приведены ниже

| H км | V_D км/с | V_S км/с | ρ г/см ³ |
|------------------|------------|------------|--------------------------|
| $0 \div 1$ | 2,6 | 1,5 | 2,75 |
| $1 \div 10$ | 5,5 | 3,2 | 2,8 |
| $10 \div 20$ | 6,3 | 3,6 | 3,0 |
| $20 \div 40$ | 7,1 | 4,1 | 3,1 |
| $40 \div \infty$ | 8,1 | 4,7 | 3,2 |

На рис. 9 показаны рассчитанные по программе синтетические сейсмограммы. Построены радиальные компоненты сейсмограмм по азимуту вокруг изображенного в центре механизма очага.

На рис. 10 показаны те же сейсмограммы, что и на рис. 9, а, но только в трех азимутальных углах (нижние трассы). Кроме суммарных сейсмограмм построены смещения в волнах P и S (верхние трассы) и P, S , обменные PS и SP (средние трассы). Последний пример иллюстрирует возможности, которые представляет программа для анализа вклада отдельных парциальных волн в суммарную сейсмограмму.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Общий вид выражения для $W_i^{(k)}(\rho)$:

$$W_i^{(k)}(\rho) = w_i(\rho, l_k) \prod_{j=0}^J K_j(\rho, l_k),$$

где $w_i(\rho, l_k)$ определяются параметрами в точках источника и приемника; K_j — коэффициенты преломления отражения; l_k — индекс k -й парциальной волны. Функции K_j полностью определяются следующими, определяемыми по индексу l_k , параметрам:

номер слоя, со стороны которого на границу падает возмущение (m);

номер слоя, на границу с которым падает возмущение ($m' = m \pm 1$);

номер слоя, в котором распространяется возмущение после взаимодействия (m'' или $m'' = m'$);

тип волны до и после взаимодействия (k, k').

Параметры k и k' могут принимать значения P или SV . Коэффициенты преломления-отражения в принятых обозначениях при $m \neq 0$ имеют вид

$$K(m, m', m'', k, k') = \frac{Q(m, m', m'', k, k')}{D(m, m')},$$

где

$$D(m, m') = \rho^2 (\mu_m d_m - \mu_{m'} d_{m'})^2 + \alpha_m \beta_m (\mu_m d_{m'} + 2\mu_m \rho^2)^2 + \\ + \alpha_{m'} \beta_{m'} (\mu_m d_m + 2\mu_m \rho^2)^2 + \rho_m \rho_{m'} (\alpha_m \beta_{m'} + \alpha_{m'} \beta_m) + \\ + 4(\mu_m - \mu_{m'})^2 \alpha_m \beta_m \alpha_{m'} \beta_{m'} \rho^2$$

и

$$Q(m, m', m', P, P) = 2\alpha_m \rho_m [(\mu_m d_{m'} + 2\mu_m \rho^2) \beta_m + (\mu_m d_m + 2\mu_m \rho^2) \beta_{m'}];$$

$$Q(m, m', m, P, P) = -\rho^2 (\mu_m d_m - \mu_{m'} d_{m'})^2 + \alpha_m \beta_m (\mu_m d_{m'} + 2\mu_m \rho^2)^2 - \\ - \alpha_{m'} \beta_{m'} (\mu_m d_m + 2\mu_m \rho^2)^2 + \rho_m \rho_{m'} (\alpha_m \beta_{m'} - \alpha_{m'} \beta_m) + \\ + 4(\mu_m - \mu_{m'})^2 \alpha_m \beta_m \alpha_{m'} \beta_{m'} \rho^2;$$

$$Q(m, m', m', P, S) = -2\rho_m \alpha_m \beta_{m'} [(\mu_m d_m - \mu_{m'} d_{m'}) - 2(\mu_m - \mu_{m'}) d_{m'} \beta_m];$$

$$Q(m, m', m, P, S) = 2\alpha_m \beta_m [(\mu_m d_m - \mu_{m'} d_{m'}) (\mu_m d_{m'} + 2\mu_m \rho^2) + \\ + 2(\mu_m - \mu_{m'}) (\mu_m d_m + 2\mu_m \rho^2) \alpha_{m'} \beta_{m'}];$$

$$Q(m, m', m', S, P) = 2\rho_m \rho^2 [(\mu_m d_m - \mu_{m'} d_{m'}) - 2(\mu_m - \mu_{m'}) \alpha_m \beta_{m'}];$$

$$Q(m, m', m, S, P) = 2\rho^2 [(\mu_m d_m - \mu_{m'} d_{m'}) (\mu_m d_{m'} + 2\mu_m \rho^2) + \\ + 2(\mu_m - \mu_{m'}) (\mu_m d_m + 2\mu_m \rho^2) \alpha_{m'} \beta_{m'}];$$

$$Q(m, m', m', S, S) = 2\rho_m \beta_{m'} [(\mu_m d_{m'} + 2\mu_m \rho^2) \alpha_m + (\mu_m d_m + 2\mu_m \rho^2) \alpha_{m'}];$$

$$Q(m, m', m, S, S) = p^2 (\mu_m d_m - \mu_{m'} d_{m'}) - \alpha_m \beta_m (\mu_m d_{m'} + 2\mu_m p^2)^2 + \\ + \alpha_{m'} \beta_{m'} (\mu_m d_m + 2\mu_{m'} p^2)^2 + \rho_m \rho_{m'} (\alpha_m \beta_{m'} - \alpha_{m'} \beta_m) - \\ - 4(\mu_m - \mu_{m'})^2 p^2 \alpha_m \beta_m \alpha_{m'} \beta_{m'}.$$

Здесь введены обозначения $\alpha_m = (1/a_m^2 - p^2)^{1/2}$; $\beta_m = (1/b_m^2 - p^2)^{1/2}$; $d_m = \beta_m^2 m - p^2$; a_m, b_m — скорости продольной и поперечной волн в слое m ($m = 1, \dots, N+1$). Для волн SH при $m' \neq 0$ имеем

$$K(m, m', m'') = \frac{\mu_m \beta_m + (-1)^{|m-m''|} \mu_{m''} \beta_{m''}}{\mu_m \beta_m + \mu_{m'} \beta_{m'}}.$$

В случае $m' = 0$ имеем

$$K(1, 0, 1, SH) = 1; \\ K(1, 0, 1, P, P) = -(d_1^2 - 4p^2 \alpha_1 \beta_1) / R_1; \\ K(1, 0, 1, P, S) = 4d_1 \alpha_1 \beta_1 / R_1; \\ K(1, 0, 1, S, P) = 4d_1 p^2 / R_1; \\ K(1, 0, 1, S, S) = (d_1^2 - 4p^2 \alpha_1 \beta_1) / R_1; \\ R_1 = d_1^2 + 4p^2 \alpha_1 \beta_1.$$

Коэффициенты конверсии имеют вид

$$K_0(P) = 4\alpha_1 \beta_1 / b_1^2 R_1; K_0(SV) = 2d_1 / b_1^2 R_1; \\ K_0(SH) = 2.$$

Функции $w_i(k, k')$ в системе координат (r, ϑ, z) имеют вид

$$w_r(P, k') = \frac{1}{4\rho_n} \left\{ \frac{\eta^3}{\alpha_n} M_{rr} + \frac{(\rho^2 - \eta^2)}{\alpha_n} M_{\vartheta\vartheta} + (-1)^{\beta_0} 2\eta^2 M_{rz} + \alpha_n \eta M_{zz} \right\}; \\ w_{\vartheta}(P, k') = \frac{1}{2\rho_n} \left\{ (\rho^2 - \eta^2) \frac{\eta}{\alpha_n} M_{r\vartheta} + (-1)^{\beta_0} (\rho^2 - \eta^2) M_{\vartheta z} \right\}; \\ w_z(P, P) = -\xi \frac{\alpha_1}{4\rho_n} \left\{ \frac{\eta^2}{\alpha_n} M_{rr} + \frac{\rho^2 - \eta^2}{\alpha_n} M_{\vartheta\vartheta} + (-1)^{\beta_0} 2\eta M_{rz} + \alpha_n M_{zz} \right\}; \\ w_z(P, S) = \xi \frac{p^2}{4\rho_n \beta_1} \left\{ \frac{\eta^2}{\alpha_n} M_{rr} + \frac{p^2 \eta^2}{\alpha_n} M_{\vartheta\vartheta} + (-1)^{\beta_0} 2\eta M_{rz} + \alpha_n M_{zz} \right\}; \\ w_r(S, k') = \frac{1}{4\rho_n} \left\{ \beta_n \frac{\eta^3}{p^3} M_{rr} + \beta_n \frac{(\rho^2 - \eta^2) \eta}{p^2} M_{\vartheta\vartheta} + (-1)^{\beta_0} d_n \frac{\eta^2}{p^2} M_{rz} - \right. \\ \left. - \beta_n \eta M_{zz} \right\}; \\ w_{\vartheta}(S, k') = \frac{1}{2\rho_n} \left\{ \beta_n \frac{(\rho^2 - \eta^2)}{p^2} M_{r\vartheta} + (-1)^{\beta_0} d_n \frac{(\rho^2 - \eta^2)}{p^2} M_{\vartheta z} \right\}; \\ w_z(S, P) = -\xi \frac{\alpha_1}{4\rho_n} \left\{ \beta_n \frac{\eta^2}{p^2} M_{rr} + \beta_n \frac{\rho^2 - \eta^2}{p^2} M_{\vartheta\vartheta} + (-1)^{\beta_0} d_n \eta M_{rz} - \beta_n M_{zz} \right\}; \\ w_z(S, S) = \xi \frac{p^2}{4\rho_n \beta_1} \left\{ \beta_n \frac{\eta^2}{p^2} M_{rr} + \beta_n \frac{\rho^2 - \eta^2}{p^2} M_{\vartheta\vartheta} + (-1)^{\beta_0} d_n \eta M_{rz} - \beta_n M_{zz} \right\}; \\ w_r(SH) = \frac{1}{4\rho_n b_n^2 \beta_n} \left\{ \eta \frac{\rho^2 - \eta^2}{p^2} (M_{rr} - M_{\vartheta\vartheta}) + (-1)^{\beta_0} \beta_n \frac{\rho^2 - \eta^2}{p^2} M_{rz} \right\};$$

$$w_{\vartheta}(SH) = \frac{1}{4\rho_n b_n^2 \beta_n} \left\{ 2\eta \frac{\rho^2 - \eta^2}{\rho^2} M_{r\vartheta} + (-1)^{\beta_0} \beta_n \frac{\eta^2}{\rho^2} M_{\vartheta z} \right\};$$

$$M_{rr} = M_{11}^0 \cos^2 \vartheta + 2M_{12}^0 \cos \vartheta \sin \vartheta + M_{22}^0 \sin^2 \vartheta;$$

$$M_{r\vartheta} = (M_{22}^0 - M_{11}^0) \sin \vartheta \cos \vartheta + M_{12}^0 (\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta);$$

$$M_{rz} = M_{13}^0 \cos \vartheta + M_{23}^0 \sin \vartheta;$$

$$M_{\vartheta\vartheta} = M_{11}^0 \sin^2 \vartheta - 2M_{12}^0 \cos \vartheta \sin \vartheta + M_{22}^0 \cos^2 \vartheta;$$

$$M_{\vartheta z} = -M_{13}^0 \sin \vartheta + M_{23}^0 \cos \vartheta;$$

$$M_{zz} = M_{33}^0;$$

$$\xi = \sin(2\alpha_J - 1) = -1; \beta_0, \alpha_J \text{ (см. 13)}.$$

Функция $\eta(\rho)$ имеет вид $\eta(\rho) = \frac{\sum_{j=0}^J h_j (v_j^{-2} - \rho^2)^{1/2} - t}{r}$, где r — эпицент-

ральное расстояние; h_j — толщина проходимого слоя; v_j — скорость распространения возмущения на j -м шагу; t — время; J — длина индекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Костров Б.В., Епифанский А.Г. Построение точных теоретических сейсмограмм для моделирования волнового поля локального землетрясения. — В кн.: Алгоритмы и практика определения параметров гипоцентров землетрясений на ЭВМ. М.: Наука, 1983, с. 98—131.
2. Петрошень Г.И., Молотков Л.А., Крауклис П.В. Волны в слоистооднородных изотропных упругих средах. Л.: Наука, 1982. 287 с.
3. Ewing W.M., Jardetsky W.S., Press F. Elastic waves in layered medium. N.Y., 1957.
4. Франк Ф., Мизес Р. Дифференциальные и интегральные уравнения математической функции. Л., 1937. 998 с.
5. Cagniard L. Reflection and retraction of progressive seismic wave. N.Y., 1962, p. 282.
6. Hoop A.T.de. A modification of Cagniard's method for solving seismic pulse problems. — Appl. Sci. Sec. B, 1952, vol. 8, p. 349—356.
7. Sato R. Seismic waves due to a dislocation source model in a multilayered medium. Pt II. Numerical calculations for a point source. — J. Phys. Earth, 1973, vol. 21, p. 401—411.
8. Подъяпольский Г.С. Распространение упругих волн в слоистой среде. — Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1959, № 8, с. 1103—1113; № 9, с. 1265—1277.

УДК 550.340

АЛГОРИТМ И ПРОГРАММА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВОЛЬТЕРРА 1-го РОДА ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ОБРАТНОЙ ЗАДАЧЕ СЕЙСМОМЕТРИИ

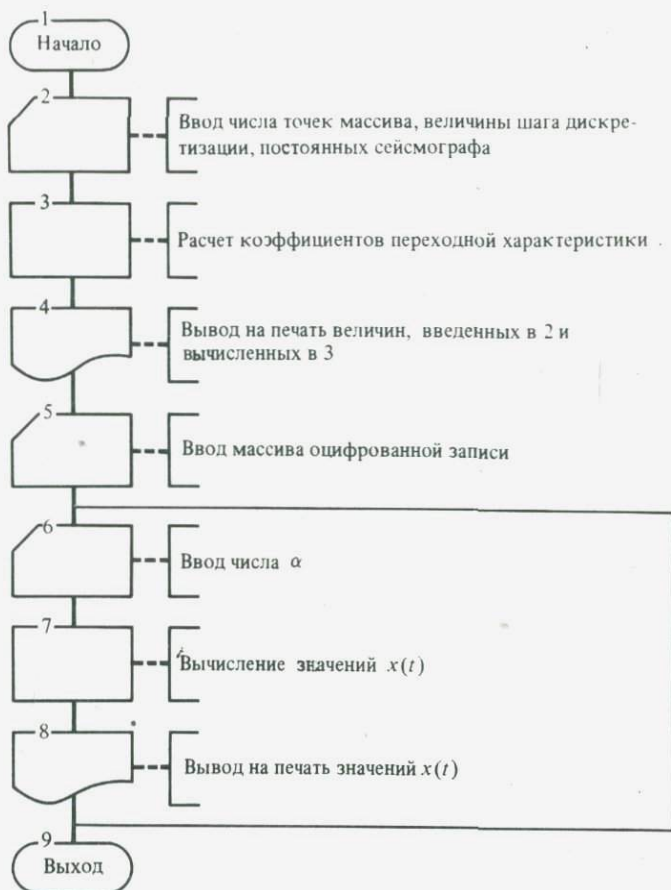
А.Н. Шульбаев

Входной сейсмический сигнал $X(t)$ в результате прохождения линейной системы F (сейсмоприемник — гальванометр) преобразуется в выходной сигнал (сейсмограмму) $Y(t)$:

$$X(t) \rightarrow \boxed{F} \rightarrow Y(t).$$

Обратная задача сейсмометрии заключается в том, чтобы при известном $Y(t)$, используя параметры или переходные характеристики системы F , определить неизвестный входной сигнал $X(t)$.

Связь между $Y(t)$ и $X(t)$ обычно выражается через известную систему



Блок-схема программы

двух дифференциальных уравнений движения [1]. Переход от этих уравнений к интегральному уравнению рассмотрен в [2].

Итак, пусть мы имеем интегральное уравнение движения в виде

$$\int_0^t g(t-\tau) \dot{X}(\tau) d\tau = Y(t), \quad (1)$$

где $g(t)$ — переходная характеристика сейсмографа; $Y(t)$ и $X(t)$ — сейсмограмма и входной сейсмический сигнал соответственно.

Функция $g(t)$ полностью определяется параметрами сейсмоприемника и гальванометра и коэффициентом связи:

$$g(t) = (b_1 \cos a_2 t + b_2 \sin a_2 t) l^{-a_2 t} + b_3 l^{-a_3 t} + b_4 l^{-a_4 t},$$

где a_i, b_i — корни и коэффициенты линейного разложения (см. [2]).

Рассмотрим алгоритм и блок-схему программы, составленной по ГОСТ 19.002-80 и ГОСТ — 19.003-80 (рис. 1).

В практических вычислениях мы имеем дело с дискретным набором $Y_i = Y(t_i)$, заданным на интервале длиной T .

Пусть отрезок $[0, T]$ разбит на равномерную сетку узлов $t_i = ih$, $h = T/n$, $j = \overline{0, n}$, тогда формулу (1) можно представить в виде

$$\sum_{j=0}^{i-1} \int_{t_j}^{t_{j+1}} g(t_i - \tau) \dot{x}(\tau) d\tau = y(t_i)$$

Считая $X(\tau) = (X_{j+1} - X_j)/h$, получим уравнение

$$\sum_{i=0}^{i-1} (X_{j+1} - X_j) D_{i-j-1} = h Y_i,$$

$i = 0,$

где

$$D_{i-j-1} = \int_{jh}^{(j+1)h} g(t_i - \tau) d\tau = \int_{(i-j-1)h}^{(i-j)h} g(S) dS.$$

В результате замены индекса суммирования в сумме

$$\sum_{j=0}^{i-1} D_{i-j-1} x_{j+1} = D_0 x_i + \sum_{j=1}^{i-1} D_{i-j} x_j$$

получим для определения систему уравнений

$$X_1 = h Y_1 / n_1,$$

$$X_i = \frac{h Y_i}{n_1} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{D_{i-j} - D_{i-j-1}}{n_1} X_j, \quad i = \overline{2, n}, \quad (2)$$

где

$$n_1 = D_0 = \int_0^h g(S) dS.$$

Как известно, интегральное уравнение Вольтерра 1-го рода некорректно поставлено относительно погрешностей правой части.

Это означает, что малым погрешностям в $Y(t)$ могут соответствовать сколь угодно большие погрешности решения. Поэтому необходимо применение какого-либо способа регуляризации.

В качестве такого параметра в данной задаче применяется α -параметр типа параметра регуляризации метода А.Н. Тихонова [3]. В этом случае регуляризованное решение уравнения (1) на основе (2) можно представить в виде

$$x_i = \frac{h y_i}{n_1 + \alpha} - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{D_{i-j} - D_{i-j-1}}{n_1 + \alpha} x_j. \quad (3)$$

Уравнение (3) является исходным для решения задачи данным способом. Вычисления производятся по приведенной выше блок-схеме. Отметим, что к настоящему времени вопрос о способе определения параметра α применительно к интегральному уравнению Вольтерра 1-го рода остается открытым. Поэтому в данной программе эта проблема решается путем подбора "подходящего" параметра α . Результаты проведенных расчетов показали, что значения α для сейсмограмм, полученных от сейсмографа СКД, находятся в пределах от 0,001 до 0,004.

В принципе можно использовать два параметра регуляризации: шаг дискретизации и α — параметр. Обоснование способа решения задачи введением двух параметров регуляризации рассмотрено в [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.; Л.: ГИТЛ, 1949. 181 с.
2. Шулбаев А.Н. Восстановление входного сейсмического сигнала с помощью интегрального уравнения Вольтерра. — В кн.: Сейсмичность и глубинное строение Сибири и Дальнего Востока. Владивосток: Изд-во ДВНЦ, 1976, с. 154—161.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1980. 285 с.
4. Шулбаев А.Н. Алгоритмы решения обратной задачи сейсмометрии: Автореф. дис. ... физ. мат. наук. Киев, 1980. 16 с.

УДК 550.34:518.5

К РЕГИСТРАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИЖЕНИЯ ПОЧВЫ

А.В. Ключевский

Магнитоэлектрический сейсмограф с гальванометрической регистрацией позволяет осуществить запись пяти кинематических элементов движения почвы [1,2]. В практике сейсмометрии при регистрации сильных движений часто применяются велосиграфы и акселерографы [3,4]. В настоящее время при расчете каналов регистрации скорости и ускорения, как правило, используются формулы метода чувствительностей [2, 5—7]. В данной работе предложен новый вариант формул расчета каналов записи пяти кинематических элементов колебаний почвы, а также оценена точность расчета при заданной точности основных параметров велосиграфа.

Рассмотрим систему двух дифференциальных уравнений, описывающих движение сейсмометра и гальванометра [5]:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + 2\epsilon_s \dot{\theta} + n_s^2 \theta = -\frac{\ddot{X}}{l} + \sqrt{\sigma^2 4\epsilon_s \epsilon_g} \frac{K_g}{K_s} \dot{\varphi}, \\ \ddot{\varphi} + 2\epsilon_g \dot{\varphi} + n_g^2 \varphi = \sqrt{\sigma^2 4\epsilon_s \epsilon_g} \frac{K_s}{K_g} \dot{\theta}, \end{cases} \quad (1)$$

где θ и φ — углы отклонения маятника и рамки гальванометра от положения равновесия, \ddot{X} — ускорение движения почвы; ϵ_s и ϵ_g — коэффициенты затухания сейсмометра и гальванометра; n_s и n_g — круговые частоты колебаний, K_s и K_g — моменты инерции маятника и рамки гальванометра; l — приведенная длина маятника; σ^2 — коэффициент связи.

Решение системы (1) по методу интеграла Фурье [1,8] дается кривой увеличения

$$V_X = V_0 W(\omega) = \frac{2A}{l} \sqrt{\frac{K_s D_s T_g}{K_g D_g T_s}} \sigma^2 \frac{T_\omega \frac{2D_g}{T_g}}{\sqrt{B^2 + C^2}} \quad (2)$$

и фазовой характеристикой

$$\gamma = \arctg \frac{B}{C} \quad (2a)$$

Здесь V_0 — коэффициент увеличения; $W(\omega)$ — амплитудно-частотная характеристика сейсмографа; $B = (u_1^2 - 1)(u_2^2 - 1) + 4D_s D_g u_1 u_2 (1 - \sigma^2)$;
 $C = 2[u_1 D_s (u_2^2 - 1) + u_2 D_g (u_1^2 - 1)]$, $u_1 = \frac{n_s}{\omega}$, $u_2 = \frac{n_g}{\omega}$, $D_s = \frac{\epsilon_s}{n_s}$, $D_g = \frac{\epsilon_g}{n_g}$;

A — оптический рычаг; $\omega = \frac{2\pi}{T_\omega}$ — круговая частота вынуждающих колеба-

ний; T_s и T_g — периоды свободных колебаний маятника и рамки гальванометра; T_ω — период вынуждающих колебаний. Выражение $2D_g/T_g$ введено в амплитудно-частотную характеристику для приведения ее к единичному уровню в прямой схеме включения сейсмометра и гальванометра.

При регистрации скорости движения почвы в системе (1) следует заменить \ddot{X} на \dot{X} . Решение системы в этом случае представим в виде кривой увеличения

$$V_{\dot{X}} = \frac{A}{\pi l} \sqrt{\frac{K_s D_s T_g^3}{K_g T_s D_g^3} \sigma^2} \frac{T_\omega^2 \frac{2D_g^2}{T_g^2}}{\sqrt{B^2 + C^2}} \quad (3)$$

и фазовой характеристики (2a).

Решение для ускорения третьей производной и интеграла от смещения почвы в общем виде можно записать так:

$$V_{X_n} = V_0 W(\omega) = \frac{2A}{(2\pi)^{n-1} l} \sqrt{\frac{K_s D_s D_g \sigma^2}{K_g T_s T_g}} \left(\frac{T_g}{D_g}\right)^n \left(\frac{T_\omega D_g}{T_g}\right)^n \frac{2}{\sqrt{B^2 + C^2}} \quad (4)$$

Формулы (2)–(4) получены для прямой схемы включения сейсмометра и гальванометра. В случае обратной схемы соединения нормировочным членом становится выражение $2D_s^n/T_s^n$, относящееся при $n = 0, 1, 2, 3, 4$ соответственно к интегралу от смещения, смещению, скорости, ускорению и третьей производной от смещения почвы. Соответствующие преобразования следует выполнить и в формулах коэффициентов увеличения.

Чтобы реализовать необходимые параметры велосиграфа, нужно выполнить расчет шунтирующих сопротивлений в схеме включения сейсмометра и гальванометра. Воспользуемся формулами из работ [9, 10] и формулой (3) и выполним расчет шунтирующих сопротивлений через величину коэффициента связи сейсмометра и гальванометров при параметрах велосиграфа, взятых из работы [5]. Там же приведены значения шунтов каналов регистрации скорости для одноканального (пускового) и двухканального велосиграфов. Результаты расчета шунтирующих сопротивлений одноканального велосиграфа приведены ниже.

| | σ^2 | $R_{ш}, \text{Ом}$ | $r, \text{Ом}$ | $R, \text{Ом}$ | $\sigma_{пр}^2$ | D_g |
|---|----------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------------|-------|
| а | $6,79 \cdot 10^{-5}$ | 143 | 150 | 4795 | $6,79 \cdot 10^{-5}$ | 0,70 |
| б | — | 143 | 146 | 4545 | $7,24 \cdot 10^{-5}$ | 0,71 |

Здесь $R_{ш}$, r и R — шунтирующие сопротивления в П-образной схеме соединения сейсмометра и гальванометра [5], а проверочные значения σ_{12}^2 и D_g вычислены при введении в формулы расчета коэффициента связи и затухания гальванометра из [9] величин шунтов, определенных нами (а) и взятых из работы [5] (б). Сравнение а и б указывает на очень малое различие в величине затухания гальванометра, рассчитанной различными способами.

Результаты вычисления шунтирующих сопротивлений двухканального велосиграфа приведены ниже, где $R_{ш1}$, $R_{ш2}$, r_1 , r_2 , R_1 , R_2 — шунтирующие сопротивления в схеме двухканального велосиграфа [5], а проверочные значения коэффициентов связи σ_{12}^2 , σ_{13}^2 и затуханий гальванометров D_g , D_g^a вычислены так же, как и в случае расчета одноканального велосиграфа. Сравнение результатов, полученных нами (а) и взятых из работы [5] (б), позволяет отметить, что с ростом значений коэффициентов связи сейсмометра и гальванометров появляется отличие в задающих параметрах

| | σ_{12}^2 | σ_{13}^2 | $R_{ш1}$, Ом | r_1 , Ом | R_1 , Ом | $R_{ш2}$, Ом | r_2 , Ом |
|---|-----------------|----------------------|----------------------|------------|------------|------------------------------------|------------|
| а | 0,0538 | $8,63 \cdot 10^{-5}$ | 409 | 201 | 450 | 11,6 | 195 |
| б | — | — | 517 | 146 | 356 | 11,9 | 146 |
| | R_2 , Ом | σ_{12}^2 пр | σ_{13}^2 пр | D_g | D_g^a | $\Delta V\dot{X}_1/V\dot{X}_1$, % | |
| а | 568 | 0,0538 | $8,63 \cdot 10^{-5}$ | 0,70 | 0,70 | | |
| б | 356 | 0,0554 | $1,40 \cdot 10^{-4}$ | 0,802 | 0,82 | 12 | |

велосиграфа. Аналогичный результат был получен для канала регистрации смещений почвы [9, 10].

Формулы, предложенные в настоящей работе, так же как и формулы метода чувствительностей, удобны в использовании при экспедиционных оперативных вычислениях и дают возможность рассчитать каналы регистрации пяти кинематических элементов движения почвы по единой схеме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. М.: Гостехиздат, 1955. 545 с.
2. Токмаков В.А. Формулы гальванометрической регистрации различных кинематических элементов колебательного движения. — В кн.: Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений. М.: Наука, 1966, с. 68—72.
3. Борисевич Е.С., Фремд В.М., Штейнберг В.В. Гальванометрическая регистрация сильных землетрясений. — В кн.: Сейсмические приборы. М.: Наука, 1973, вып. 7, с. 3—12.
4. Борисевич Е.С., Кирнос Д.П., Фремд В.М. Сейсмические приборы для регистрации сильных землетрясений, работающие в "ждушем" режиме. — В кн.: Автоматизация сейсмологических наблюдений. Владивосток: Изд-во СахКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1976, с. 53—60.
5. Аппаратура и методика сейсмометрических наблюдений в СССР. М.: Наука, 1974. 243 с.
6. Токмаков В.А. Сейсмоприемник ОСП и опыт его эксплуатации. — В кн.: Инженерное описание сейсмических колебаний (Вопросы инженерной сейсмологии), М.: Наука, 1974, вып. 16, с. 147—152.
7. Токмаков В.А., Жигальцев А.А. Многоканальный сейсмограф для работы на больших загрузках. — В кн.: Бюллетень по инженерной сейсмологии. Ереван: Изд-во АН Арм. СССР, 1972, вып. 7, с. 85—101.
8. Смирнов В.И. Курс высшей математики. М.: Наука, 1974. Т. II. 656 с.
9. Ключевский А.В. Расчет коэффициента связи и шунтирующих сопротивлений в П-образной схеме соединения сейсмоприемника и гальванометра. — Геология и геофизика, 1978, № 7, с. 99—105.
10. Ключевский А.В. Новый способ расчета двухканального сейсмографа. — Геология и геофизика, 1979, № 8, с. 120—132.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----|
| Предисловие | 3 |
| Определение координат гипоцентров на основе аналитического решения уравнений прямых волн. <i>А.С. Костинский, Е.И. Поречнова, Б.Г. Пустовитенко</i> | 5 |
| Способ быстрого определения положения эпицентра при минимуме исходной информации. <i>А.А. Поплавский, А.Г. Тоток</i> | 23 |
| Программа и некоторые результаты определения на ЭВМ эпицентров землетрясений Приморья и Приамурья. <i>Т.А. Андреев, С.В. Мишин, Т.В. Нагорных, Л.Н. Поплавская</i> | 28 |
| Определение гипоцентров землетрясений Северо-Муйского района групповым способом. <i>М.Б. Вертлиб</i> | 36 |
| Исследование точности определения координат гипоцентров землетрясений. <i>Н.Б. Пивоварова</i> | 48 |
| Алгоритм и результаты машинного определения координат землетрясений по данным региональной сети (на примере Кавказа). <i>Н.Б. Пивоварова, Л.Б. Славина</i> | 53 |
| Определение на ЭВМ магнитудно-энергетических характеристик дальневосточных землетрясений. <i>С.В. Ларин, Л.Н. Поплавская, О.Н. Соловьёва, С.Л. Соловьёв</i> | 75 |
| Оценка эффективности сети сейсмических станций и карта представительности землетрясений Байкальской зоны. <i>С.И. Голенецкий</i> | 80 |
| О разделении двух наложившихся импульсов. <i>Д.В. Долгополов, А.И. Пасторов</i> | 86 |
| Применение спектрального анализа в задачах повышения отношения сигнал/шум в сейсмологических наблюдениях. <i>А.И. Иващенко, Н.В. Краева, И.Н. Тихонов</i> | 92 |
| Алгоритм построения точных синтетических сейсмограмм для произвольного дипольного источника. <i>А.Г. Епифанский</i> | 100 |
| Алгоритм и программа для решения интегрального уравнения Вольтерра 1-го рода применительно к обратной задаче сейсмометрии. <i>А.Н. Шульбаев</i> | 116 |
| К регистрации различных кинематических элементов движения почвы. <i>А.В. Ключевский</i> | 119 |

УДК 550.344

Костинский А. С., Поречнова Е. И., Пустовитенко Б. Г. Определение координат гипоцентров на основе аналитического решения уравнений прямых волн. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Описан алгоритм и программа расчета координат гипоцентров местных землетрясений на ЭВМ для регионов с неизвестным строением среды. На основе уравнений прямых волн в аналитическом виде находится точное решение задачи о восстановлении координат гипоцентра, скорости сейсмических волн и времени в очаге по известным моментам вступлений прямых однопериодных волн на группу (M) станций. Приведено решение для случая $N \geq 4$ и 5. В программе предусмотрены различные варианты расчета времени в очаге в зависимости от соотношения имеющихся вступлений волн P и S , а также отбраковки грубых выбросов при усреднении всех параметров.

Программа прошла опытную проверку на модельных примерах и реальных землетрясениях Крыма, Карпат и Кавказа. Изучено влияние на точность определения параметров гипоцентра взаимного расположения очага и станций регистрации.

Табл. 2. Ил. 3. Библиогр. 12 назв.

УДК 550.341.3

Поплавский А. А., Тоток А. Г. Способ быстрого определения положения эпицентра при минимуме исходной информации. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Описан алгоритм определения положения эпицентра для случая, когда известен лишь порядок поступления на сейсмические станции однопериодной информации. В качестве исходной информации о строении среды используется предположение о том, что вещество Земли является изотропным и механические свойства его зависят только от радиальной координаты (начиная с центра Земли).

Решение задачи об эпицентре сводится к поиску области, для каждой точки которой порядок возрастания эпицентральных расстояний соответствует заданному.

Алгоритм позволяет определять положение эпицентра с точностью $\pm (7 \div 30)$ км, при этом средняя затрата машинного времени на определение одного эпицентра составила менее 5 с.

Ил. 1. Библиогр. 3 назв.

УДК 550.341.3

Андреев Т. А., Мишин С. В., Нагорных Т. В., Поплавский А. Л. Н. Программа и некоторые результаты определения на ЭВМ эпицентров землетрясений Приморья и Приамурья. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Успешно прошла опытную эксплуатацию программа для определения координат эпицентров, в основу алгоритма которой положен принцип постоянства скоростей прямых волн \bar{P} и \bar{S} .

Впервые для региона Приморья и Приамурья получены и проанализированы экспериментальные данные о поле скоростей $V_{\bar{P}}$, $V_{\bar{S}}$ и отношении $V_{\bar{P}}/V_{\bar{S}}$.

Установлены пределы применимости исследуемого алгоритма в условиях существующей геометрии эпицентр-станции для основных сейсмоактивных районов Приморья и Приамурья.

Табл. 2. Ил. 4. Библиогр. 3 назв.

УДК 550.341

Вертлб М. Б. Определение гипоцентров землетрясений Северо-Муйского района групповым способом. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Предложен групповой способ определения гипоцентров землетрясений применительно к условиям недостаточной информации с целью обогащения совокупных данных о близкорасположенных, почти совпадающих в пространстве очагах. Способ опробован на 2270 землетрясениях 1977–1979 гг.,

что позволило оценить глубины для 800 очагов, 500 из которых приходится на землетрясения роя.

Табл. 3. Ил. 5. Библиогр. 8 назв.

УДК 518.550

П и в о в а р о в а Н. Б. Исследование точности определения координат гипоцентров землетрясений. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Рассмотрены вопросы точности определения глубин очагов землетрясений в зависимости от ошибок во временах начала землетрясений при использовании различных типов минимизируемых функционалов в очаге различных моделей среды.

Ил. 5. Библиогр. 2 назв.

УДК 550.348:518.5

П и в о в а р о в а Н. Б., С л а в и н а Л. Б. Алгоритм и результаты машинного определения координат землетрясений по данным региональной сети (на примере Кавказа) — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Рассмотрен алгоритм определения параметров гипоцентров местных землетрясений по сейсмологическим данным. Для сейсмического региона Кавказа предложена блоковая скоростная модель среды, на основе которой проведено переопределение параметров гипоцентров около 1500 землетрясений. Проведено сравнение полученных координат эпицентров и глубины с результатами ручного определения.

Табл. 3. Ил. 6. Библиогр. 10 назв.

УДК 550.341.3 + 550.34.013.222

Л а р и н С. В., П о п л а в с к а я Л. Н., С о л о в ъ е в а О. Н., С о л о в ъ е в С. Л. Определение на ЭВМ магнитно-энергетических характеристик дальневосточных землетрясений. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

На ЭВМ М-222 в СахКНИИ реализована программа, основу которой составили 15 региональных шкал, позволяющих определить M и (или) K дальневосточных землетрясений в зависимости от глубины очага, типа зарегистрированной сейсмической волны, динамического диапазона используемой аппаратуры.

Особенностью программы является организация быстрого поиска необходимой таблицы калибровочной функции. В зависимости от характера и объема исходной информации для каждого землетрясения рассчитываются не только среднестанционные значения M и K , но и стандартные отклонения δM и σ_K этих значений.

Анализ статистик σ_M и σ_K позволил выполнить предварительные оценки надежности используемых региональных магнитудно-энергетических шкал.

Табл. 2. Ил. 2. Библиогр. 8 назв.

УДК 550.348

Г о л е н е ц к и й С. И. Оценка эффективности сейсмических станций и карта представительности землетрясений Байкальской зоны. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: наука, 1985.

Анализируется эффективность действующей сети сейсмических станций Байкальской зоны. По материалам бюллетеней землетрясений Прибайкалья за 1976—1977 гг. оценена полнота регистрации на 50 и 90% уровне для событий ниже 10-го энергетического класса. Построена карта представительности землетрясений Байкальской зоны.

Табл. 1. Ил. 2. Библиогр. 8 назв.

УДК 550.334

Д о л г о п о л о в Д. В., П а с т о р о в А. И. О разделении двух наложившихся импульсов. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

В работе предлагается алгоритм определения спектров двух наложившихся

импульсов по спектру их суммы. Алгоритм является решением обратной задачи, которое, как показано в работе, корректно при введении априорных, физически обоснованных предложений о форме амплитудных и фазовых спектров интерферирующих сигналов.

Ил. 3. Библиогр. 1 назв.

УДК 550.340 + 550.342

И в а щ е н к о А.И., К р а е в а Н.В., Т и х о н о в И.Н. Применение спектрального анализа в задачах повышения отношения сигнал/шум в сейсмологических наблюдениях. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Описываются метод и соответствующий ему комплекс программ для ЭВМ ЕС 1022, позволяющие найти частотную характеристику сейсмографа, обеспечивающую максимальное отношение сигнал/шум.

Ил. 5. Библиогр. 6 назв.

УДК 550.348:518.5

Е л и ф а н с к и й А.Г. Алгоритм построения точных синтетических сейсмограмм для произвольного дипольного источника, действующего в слоисто-однородной изотропной среде. Предложен алгоритм построения множества индексов всех кинематически возможных парциальных волн. Разложение волнового поля на парциальные волны позволяет проанализировать вклад каждой отдельной волны в суммарное смещение на сейсмограмме в каждый момент времени. Приведенные примеры иллюстрируют данную возможность.

В работе содержится описание алгоритмов построения синтетических сейсмограмм для произвольного дипольного источника, действующего в слоисто-однородной изотропной среде. Предложен алгоритм построения множества индексов всех кинематически возможных парциальных волн. Разложение волнового поля на парциальные волны позволяет проанализировать вклад каждой отдельной волны в суммарное смещение на сейсмограмме в каждый момент времени. Приведенные примеры иллюстрируют данную возможность.

Ил. 10. Библиогр. 8 назв.

УДК 550.340

Ш у б а е в А.Н. Алгоритм и программа для решения интегрального уравнения Вольтерра 1-го рода применительно к обратной задаче сейсмометрии. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Описан алгоритм решения обратной задачи сейсмометрии, основанный на численном решении интегрального уравнения Вольтерра 1-го рода. Приближенные значения восстановленного сигнала получаются путем подбора параметра регуляризации.

Ил. 1. Библиогр. 4 назв.

УДК 550.34:518.5

К л ю ч е в с к и й А.В. К регистрации различных кинематических элементов движения почвы. — В кн.: Применение ЭВМ в сейсмологической практике. М.: Наука, 1985.

Предложен вариант формул расчета каналов записи пяти кинематических элементов колебаний почвы. Оценена точность расчета при заданной точности основных параметров велосиграфа.

Библиогр. 10 назв.

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ "НАУКА"

готовятся к печати книги:

Математические методы в сейсмологии и геодинамике (Вычислительная сейсмология, вып. 19). — 18 л. — 2р. 70к.

Сборник посвящен применению новых математических методов к решению актуальных задач сейсмологии и теоретической геодинамики. Сопоставлены статистические и логические методы решения задачи о прогнозе мест сильнейших землетрясений, рассмотрены разнообразные аспекты долгосрочного прогноза времени землетрясений и математические модели сейсмичности. Исследован ряд обратных задач волновой сейсмики и теории рассеяния; получены новые теоретические и численные результаты в изучении конвекционной неустойчивости Земли. Предложены способы повышения эффективной чувствительности длиннопериодной сейсмологической аппаратуры.

Для геофизиков.

Детальные инженерно-сейсмологические исследования (Вопросы инженерной сейсмологии, вып. 27). — 20л. — 3р.

Статьи сборника посвящены разработке методики детального сейсмического районирования, оценке инженерных характеристик колебаний грунтов вблизи очагов землетрясений, исследованию спектрально-временного состава коровых и глубокофокусных землетрясений, анализу записей, макросейсмики поверхностных нарушений, изосейст сильных землетрясений.

Для специалистов сейсмологов, геофизиков, геологов.

Основные проблемы сейсмотектоники. — 10л. — 1р. 50к.

Сборник посвящен актуальным вопросам сейсмотектоники. Рассмотрены проблемы напряженного состояния земной коры; пространственно-временных соотношений эпицентров землетрясений с другими сейсмотектоническими характеристиками различных регионов СССР; связи сейсмичности с процессами, про-

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ
В СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ
ПРАКТИКЕ**

Методические работы ЕССН

*Утверждено к печати
Межведомственным советом по сейсмологии
и сейсмостойкому строительству
при Президиуме АН СССР
и ордена Ленина Институтом физики Земли
им. О.Ю. Шмидта*

Редактор издательства
В.К. Белова

Художник
Д.А. Шпаков

Художественный редактор
Н.Н. Власик

Технический редактор
Н.А. Торгашова

Корректор
Т.И. Шеповалова

Набор выполнен в издательстве
на наборно-печатающих автоматах

ИБ № 28771

Подписано к печати 07.04.85. Т — 10767
Формат 60 x 90 1/16. Бумага для глубокой печати
Гарнитура Универс. Печать офсетная
Усл.печ.л. 8,0 + 0,1 вкл. Усл.кр.-отт. 8,2. Уч.-изд.л. 9,4
Тираж 850 экз. Тип. зак. 426. Цена 1р. 40к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство "Наука" 117864 ГСП-7, Москва В-485,
Профсоюзная ул., д. 90

Ордена Трудового Красного Знамени
1-я типография издательства "Наука"
199034, Ленинград В-34, 9-я линия, 12

текающими в земной коре; методы изучения сейсмогенерирующих структур и сейсмодислокаций; новейшей и глубинной тектоники сейсмоактивных регионов СССР.

Для сейсмологов.

Заказы просим направлять по одному из перечисленных адресов магазинов "Книга – почтой" "Академкнига"

- | | | | |
|--------|---|--------|--|
| 480091 | Алма-Ата, ул. Фурманова, 91/97 | 630090 | Новосибирск, Академгородок, Морской проспект, 22 |
| 370005 | Баку, ул. Джапаридзе, 13 | 620151 | Свердловск, ул. Мамия-Сибиряка, 137 |
| 734001 | Душанбе, проспект Ленина, 95 | 700029 | Ташкент, ул. Ленина, 73 |
| 252030 | Киев, ул. Ленина, 42 | 450059 | Уфа, ул. Р. Зорге, 10 |
| 443002 | Куйбышев, проспект Ленина, 2 | 720001 | Фрунзе, бульвар Дзержинского, 42 |
| 197110 | Ленинград, П-110, Петрозаводская ул., 7 | 310003 | Харьков, ул. Чернышевского, 37 |
| 117192 | Москва, Мичуринский проспект, 12 | | |

1 р. 40 к.

4358

