

ГУСЕВ А. А.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИПОЦЕНТРОВ БЛИЗКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ НА ЭВМ

Переход к массовой обработке сейсмологической информации на ЭВМ — характерная тенденция в современной сейсмологии. В настоящей работе обсуждаются вопросы методики определения гипоцентров (координат и глубин) близких землетрясений по данным о временах вступлений сейсмических волн на станциях сейсмической сети на примере Камчатки. Рассмотрены вопросы построения алгоритма обработки данных и некоторые элементы его программной реализации.

До последнего времени массовое определение гипоцентров на Камчатке, как и во многих других регионах СССР, велось «вручную». Применялся известный метод палеток изохрон Ю. В. Ризниченко (1958), введенный на Камчатке С. А. Федотовым и И. П. Кузиным (Федотов и др., 1964). Это довольно эффективный метод, использующий годограф. Создание программы для ЭВМ, способной с ним конкурировать, оказалось достаточно сложным. Для полного решения задачи потребовалась разработка нескольких последовательных версий программы и большой объем экспериментального счета. Надо заметить, что положение при обработке близких землетрясений отлично от того, которое имеет место при обработке телесейсмических данных. В последнем случае эффективных способов обработки данных без ЭВМ не существует, и успех машинной обработки был сразу абсолютным.

Основные недостатки методики ручной обработки, от которых удалось избавиться при переходе на ЭВМ, следующие:

- 1) неточности изготовления рабочего планшета, палеток, ошибка плоского приближения к сферической Земле, ошибка интерполяции между палетками, невозможность использования станций, расположенных вне рамок планшета;
- 2) субъективизм при выборе наилучшего решения по большому числу станций среди нескольких палеток, возможность подгонки при снятии фазы S при построении графика Вадати, а также необходимость контроля за работой обработчика;
- 3) невозможность построения надежной оценки точности;
- 4) отсутствие контроля за возможностью двузначных решений, порождающее иногда грубые ошибки глубины (см., например, Гусев, Шумилина, 1976).

Важное дополнительное преимущество, которое достигается при внедрении машинной обработки, заключается в том, что создается возможность использования в перспективе горизонтально-неоднородных моделей среды. Это позволит существенно улучшить точность определения гипоцентров, поскольку в настоящее время эта точность как при машинной, так и при ручной обработке определяется в основном ошибками временной модели среды в виде среднего годографа.

Создание эффективного алгоритма для решения задачи определения гипоцентров потребовало как изучения опыта, накопленного в данной области, так и проведения теоретического анализа недостаточно разработанных вопросов. В настоящее время существует большое количество различных программ для определения гипоцентров и эпицентров в условиях близких и телесейсмических сетей станций. Телесейсмические программы в основном следуют принципам первой такой программы, созданной Б. А. Болтом (Bolt, 1960). В них, как правило, используются только вступления волн P , применяется нелинейный итеративный метод наименьших квадратов с исключением грубых ошибок, обычно по схеме метода однородной редукции Джеффриса (Jeffreys, 1961). Важно отметить, что оценка области ошибки методами математической статистики, предложенная для данного случая Е. А. Флинном (Flynn, 1965), сохраняется до сих пор в программах, используемых Международным сейсмологическим центром и NEIC (США). Мы уже критиковали ранее этот род оценок точности (Гусев, 1974). В последнее время составители американского бюллетеня окончательно признали неадекватность этих оценок. В стандартном предисловии бюллетеней PDE NEIC за 1977 г. отмечается, что формальные стандартные отклонения имеют тенденцию недооценивать величину возможной ошибки. Таким образом, вопрос построения надежных оценок точности актуален и должен решаться заново.

Программы определения гипоцентров близких землетрясений обычно исходят из тех же расчетных схем (см. Абуталиев и др., 1967; James et al., 1969; Lee, Lahg, 1972). Важное различие заключается в использовании дополнительно к фазам P еще и фаз S , а в простейших вариантах — просто разностей $S-P$. Как отмечалось ранее (James et al., 1969), при обработке данных о близких землетрясениях возникают определенные трудности при разработке алгоритма минимизации. Причина в том, что при поиске гипоцентра (в отличие от эпицентра) для поверхностного очага задача является существенно нелинейной, а это приводит к неустойчивости поиска. Этих трудностей ранее избегали отказом от поиска по глубине и применением перебора фиксированных значений глубины. Для случая Камчатки при большом диапазоне возможных глубин это неэффективный путь, поэтому необходимо применение подходящего алгоритма поиска.

Другая проблема связана с определением момента возникновения, или времени в очаге t_0 . В принципе кажется целесообразным определять t_0 совместно с гипоцентром (т. е. вести поиск по четырем переменным), в то время как в практике ручной обработки t_0 определяется независимо по графику Вадати. Тот же подход применен во многих из ранее созданных программ для обработки близких землетрясений. Необходимо сделать обоснованный выбор из этих альтернатив.

Перейдем к математическому рассмотрению задачи определения гипоцентра и времени возникновения t_0 землетрясения, имея в виду создание практического алгоритма и программы. Геометрически гипоцентр есть некоторая точка в пространстве переменных: $x_1 \equiv h$ — глубина, $x_2 \equiv \varphi$ — широта, $x_3 \equiv \lambda$ — долгота. Время возникновения $x_0 \equiv t_0$ — четвертая независимая переменная, характеризующая источник. Произвольную точку пространства $\{x_0, x_1, x_2, x_3\}$ обозначим x_i , а через x_i обозначим истинные гипоцентр и время возникновения. Теоретическое (согласно принятой модели среды) время прихода P - или S -волны на j -тую станцию сети с координатами φ_j, λ_j определяется как

$$G_j^{P,S}(x_i) \equiv x_0 + g^{P,S}(h, \Delta_j),$$

где Δ_j — эпицентрально-гипоцентральное расстояние j -той станции, $\cos \Delta_j = \sin \varphi \sin \varphi_j + \cos \varphi \cos \varphi_j \cos(\lambda - \lambda_j)$ и $g^{P,S}$ — принятый годограф P - или S -волн. Для

учета несферичности Земли Δ_j можно рассчитывать по геоцентрическим, а не по географическим координатам, а также вносить поправки на эллиптичность (см. Буллен, 1966).

Задача сводится теперь к выбору вектора x_i , такого, чтобы наилучшим образом согласовать наблюдаемые $T_j^{P,S}$ и расчетные $G_j^{P,S}$ времена. Важнейший вопрос — выбор критерия — заключается в том, в каком смысле требовать этого согласия. Чтобы правильно выбрать критерий, необходимо иметь ясное представление о причинах расхождения между $T_j^{P,S}$ и $G_j^{P,S}$. В работе автора (Гусев, 1974) эти расхождения подробно проанализированы на материале невязок определения гипоцентров на Камчатке нелинейным методом наименьших квадратов. Для фаз P показано, что невязка определяется ошибками следующих трех видов.

1. Ошибка модели, или ошибка годографа, связанная с отличием времен пробега в реальной горизонтально-неоднородной среде от среднего регионального годографа. Ошибка имеет систематический характер, ее величина — порядка 1 с, предельные значения — около 2 с. (В данном контексте «систематическая» ошибка — это величина, которая повторяется от землетрясения к землетрясению в пределах некоторого участка, будучи в среднем по региону близка к нулю.)

2. Ошибка отсчета, связанная с неточностями службы времени и необходимостью отсчета момента вступления на фоне помех. Ошибка случайная, ее среднеквадратичное отклонение — 0,2 с для i -фаз, 0,4 с для e -фаз.

3. Ошибка идентификации, связанная с необходимостью выделения вступлений на фоне микросейсм (для P -фаз) или предыдущей части записи. Ошибка возникает в 5—10% случаев и может достигать нескольких секунд. В нашем случае, таким образом, ошибка модели является преобладающей. Для телесейсмических наблюдений аналогичные результаты получила Х. Фридман (Freedman, 1968).

Допустим сначала отсутствие ошибок других видов и предположим, что для каждой станции и типа фазы ошибки модели ограничены некоторым пределом $D_j^{P,S}$. Тогда решение (в виде области возможных значений x_i) определится из системы неравенств

$$\rho_j \equiv |T_j^{P,S} - G_j^{P,S}(x_i)|/D_j^{P,S} \leq 1. \quad (1)$$

Введем обозначение $\rho = \max_j \rho_j$ для максимальной из левых частей неравенств (1). Тогда центр области (1) или минимаксное решение x_i^M определяется условием

$$\min_{x_i} \rho(x_i) \equiv \min_{x_i} \max_j (\rho_j(x_i)) = \rho(x_i^M). \quad (2)$$

Область (1) с центром, определяемым условием (2), дает решение задачи для данного случая. Однако, как известно (см. Хемминг, 1968), на положение точки x_i^M будут в наибольшей мере влиять данные с максимальными отклонениями от модели. Если мы учтем, наряду с ошибками модели, еще и возможность ошибок идентификации, то увидим, что подобные ошибки будут существенно влиять на минимаксное решение, а это нежелательно.

Более привлекательно в этом аспекте решение метода наименьших квадратов, которое и было выбрано в качестве основного. Формально оно получается следующим образом. Возведем в квадрат и сложим неравенства (1) для всех станций и фаз. Мы получим следующее неравенство для функции критерия:

$$S(x_i) = \sum_{j=1}^N (|T_j - G_j(x_i)|/D_j)^2 w_j \leq N'. \quad (3)$$

Здесь и далее опускаем индексы P и S и считаем, что индекс j нумерует фазы, $j=1, 2, \dots, N$. Весовой множитель w_j зависит от взвешенной невязки $r_j = |T_j - G_j(x_i)|/D_j$:

$$w_j = w(r_j) = \begin{cases} 1 & \text{при } r < 1 \\ 0 & \text{при } r > 1 \end{cases} \quad (4)$$

и N' — число фаз с $w_j \neq 0$. Через множитель w_j в решении м.н.к. проявляется сохраняющее силу условие (1). Таким образом, в решении будет учтена необходимость исключения «грубых» ошибок идентификации. Небольшие ошибки идентификации (близкие к D_j или меньше) при этом, конечно, не могут быть исключены. Центр $\hat{x}_i$ области (3), определяемый условием

$$\min_{x_i} S(x_i) = S(\hat{x}_i),$$

будет искомым точечным решением, а размеры области (3) будут определять его точность.

Определенная трудность может возникнуть из-за того, что в силу правила исключения грубых ошибок (4) функция в правой части (3) при удалении за границы минимаксной области (1) начнет скачкообразно убывать и, наконец, станет равна нулю на некотором удалении от этих границ. Такой «глобальный минимум» функции S имеет чисто формальный характер. Алгоритм поиска должен обеспечить невозможность появления этого минимума в качестве решения. Практическая реализация поиска требует поэтому эффективного алгоритма минимизации функции S , учитывающего упомянутую трудность. Необходимо также корректный выбор констант $D_j^{P,S}$.

С учетом всех изложенных требований в программе был применен алгоритм Левенберга — Марквардта (Ортега, Рейнболдт, 1975; Химмельблау, 1973) для нелинейного итерационного м.н.к.-поиска. Обозначив для n -го приближения вектор невязок $T_j - G_j(x_i^n)$ через f_j^n или $\mathbf{f}$, матрицу производных $(\partial G_j / \partial x_i | x_i = x_i^n) = (A_{ij}^n) = \mathbf{A}$, матрицу весов $(W_{jk}^n) = (D_j^{-2} w(r_j^n) \delta_{jk}) = \mathbf{W}$ и вводя матрицу $(B_{ij}^n) = \mathbf{B} = ((\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})_{ij} \delta_{ij})$ (не суммировать!), имеем

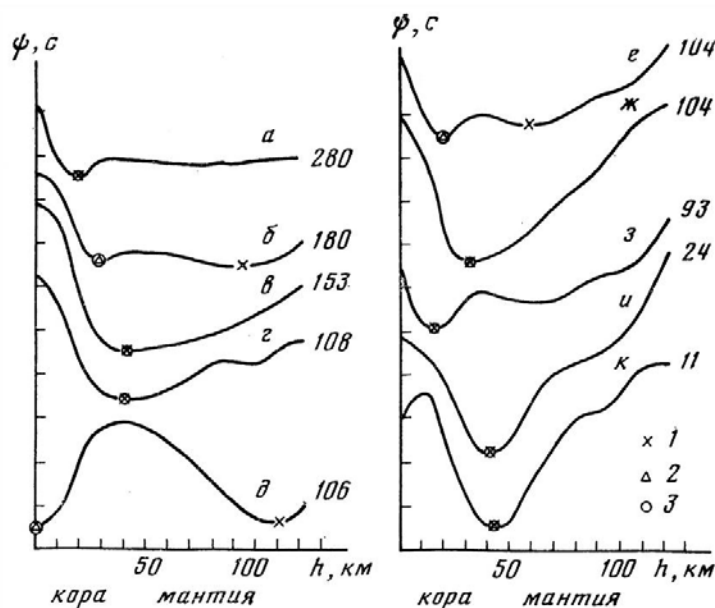
$$\mathbf{x}^{n+1} = \mathbf{x}^n + \Delta \mathbf{x}^n = \mathbf{x}^n + \beta (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A} + \alpha \mathbf{B})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{f}^n. \quad (5)$$

Здесь параметр демпфирования β и стабилизирующий параметр α подбираются на каждом шаге поиска согласно рекомендациям Бокса и Дженкинса (1974).

Для обхода упомянутой трудности со ступенчатой $w(r_j)$ (4), пользуясь идеей метода штрафных функций, функцию (4) заменяем на сглаженную ступеньку, сначала вида $1/(1+\sqrt{r})$, а затем вида $1/(1+r)^2$. Только после этого поиск повторяется в третий раз с весовой функцией (4).

Выбор констант $D_j^{P,S}$, определяющих предельные ошибки годографа, производится по следующему правилу. Принято, всегда что $D_j^S = 1,73 \cdot D_j^P$. Величина $D^P = D_1$ при $g^P > t_1$; в противном случае $D^P = D_2 + (D_1 - D_2) g^P / t_1$, где D_1 , D_2 и t_1 — некоторые константы. Таким образом, мы предполагаем здесь постоянную абсолютную ошибку годографа D_1 при $g^P > t_1$, т. е. при больших гипоцентральных расстояниях, и постоянную относительную ошибку u при $g^P < t_1$ (при малых расстояниях). Константа D_2 введена, чтобы ограничить вес фазы при очень малых гипоцентральных расстояниях. На основании результатов работы (Гусев, 1974) принято $D_1 = 2$ с, $D_2 = 0,4$ с, $t_1 = 20$ с.

Описанная схема минимизации предполагала единственность минимума функции S . Фактически при глубинах очага 0—100 км и эпицентральном расстоянии ближайшей станции свыше 100 км нередко функ-



Примеры зависимости среднеквадратической невязки Ψ (в окрестности ее минимума) от глубины h при фиксированном эпицентре и варианты глубины гипоцентра, найденные программой. Графики $\Psi(h)$ для разных землетрясений произвольно смещены по вертикали; цифры у кривых — эпицентральные расстояния ближайшей станции в км. 1 — первый вариант решения, найденный программой при «свободном» м. н. к.-поиске; 2 — второй вариант решения, найденный с помощью описанного в тексте дополнительного алгоритма; 3 — окончательный вариант, выбранный интерпретатором из первых двух. Пояснения а—к — в тексте.

ция S имеет два четко выраженных минимума. Соответствующие эпицентры близки, но глубины очагов находятся в интервалах 0—30 и 70—100 км.

На рисунке приведено несколько вариантов зависимости нормированной функции $\Psi = \sqrt{S/\sum W_{ij}}$ от глубины при фиксированном эпицентре.

Приведены примеры однозначного решения с более (ж, и, к) или менее (в, г) четко определенной глубиной, а также двузначного решения с четко выделенными вариантами решения (д) и с областью неопределенности по глубине, захватывающей оба варианта решения (а, б). В случаях е и з только один из двух минимумов $\Psi(h)$ приемлем. На наличие реальной опасности возникновения кинематически неоднозначных решений мы указывали и ранее (Гусев, 1974; Гусев и Шумилина, 1976). Для выявления подобных случаев предусмотрен специальный алгоритм, который исследует в окрестности уже найденного минимума функцию $\Psi(h)$ (при фиксированном эпицентре) на наличие второго минимума. Обнаружив его, управляющий блок программы повторяет поиск в его окрестности, задемпфировав шаг по h . В 1—3% случаев при этом выявляется наличие второго варианта решения. Выбор между двумя вариантами делает интерпретатор на основе внешнего вида записи, который меняется с глубиной.

Описанный алгоритм может работать как в режиме поиска по четырем переменным (режим 1), так и в режиме поиска только гипоцентра с фиксацией значения t_0 , определенного предварительно по графику Вадати (режим 2). В этом случае алгоритм определения t_0 следующий:

$$t_0 = \frac{\sum_i w_i^P w_i^S [T_i^P - (\theta - 1)^{-1} (T_i^S - T_i^P)]}{\sum_i w_i^P w_i^S}, \quad (6)$$

где снова j — номер станции, а $\omega_j^{P,S} = D_j^{P,S} \omega(r_j^{P,S})$. Используется фиксированное среднее для Камчатки значение $\theta = 1,73$. Выбор одного из двух описанных режимов можно сделать, если учесть, что отклонения от модели среднего годографа для P - и S -волн на одной и той же станции «сильно коррелированы». Иными словами, относительные вариации коэффициента θ существенно меньше, чем вариации скоростей. Поэтому точность определения t_0 по графику Вадати существенно выше, чем в режиме 1. Режим 2 в этой связи принят за основной.

Перейдем к вопросам построения оценок точности. Область (3) определяет собой возможные положения гипоцентра при заданных предельных ошибках $D_j^{P,S}$. Перепишем (3) в виде

$$S(x_i) - S(\hat{x}_i) \leq N' - S(\hat{x}_i). \quad (7)$$

Линеаризованный вариант этого неравенства определяет собой эллипсоид:

$$(\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}})^T (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A}) (\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}) \leq N' - S(\hat{\mathbf{x}}). \quad (8)$$

В этом случае габаритные размеры эллипсоида Δx_i , определяющие пределы изменений параметра x_i внутри эллипсоида, имеют вид:

$$\Delta x_i = \sqrt{(N' - S(\hat{\mathbf{x}})) (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})_{ii}^{-1}}. \quad (9)$$

Разработанная версия программы ограничивается построением линеаризованных оценок точности, что удовлетворительно для эпицентра, но не всегда дает надежную оценку точности по глубине. Этот компромисс был принят из-за сложности в программировании построения аналога оценки (9) для нелинейного случая.

Определенным недостатком оценок (7), (8), (9) является то, что они предполагают крайний случай, когда все истинные невязки $T_j - G_j(\check{x}_i)$ одновременно достигают своих предельных значений. В то же время известно (Кондорская и др., 1966; Freedman, 1968; Гусев, 1974), что расчетные невязки $\check{f}_j = T_j - G_j(\hat{x}_i)$ имеют эмпирическую функцию распределения, близкую к нормальной, с несколько увеличенными «хвостами». Поэтому приведенные оценки будут иметь пессимистический характер, а реальная точность будет несколько лучше.

Чтобы построить оценку, характеризующую реальную точность, приходится пожертвовать строгостью, и дальнейшие рассуждения имеют характер правдоподобных, поскольку упомянутая функция распределения не имеет статистического смысла. Будем моделировать истинную ошибку годографа суммой двух нормальных случайных величин с равными дисперсиями σ_0^2 и нулевым средним, одна из которых представляет собой ошибку «в районе эпицентра», а другая — ошибку «в районе станции». Допустим, что в наихудшем случае, характеризующем точность, первая ошибка вообще не проявится в величинах наблюдаемых невязок (а приведет только к сдвигу гипоцентра). Тогда дисперсия σ_f^2 , оцененная по невязкам, и дисперсия ошибки годографа σ_1^2 будут связаны с σ_0^2 следующим образом:

$$\sigma_f^2 = \sigma_0^2 = \frac{1}{2} \sigma_1^2. \quad (10)$$

Будем теперь считать известным и одинаковым для всех станций и фаз отношение γ^2 дисперсии σ_f^2 ошибки годографа для данной фазы к квадрату соответствующей предельной ошибки

$$\gamma^2 = \sigma_f^2 / D_j^2 = \sigma_1^2 / D_1^2. \quad (11)$$

Тогда (см. Рао, 1968)

$$S(\tilde{x}_i) \sim \gamma^2 X_N^2, \quad (12)$$

но по предположению

$$S(\hat{x}_i) \sim \frac{1}{2} \gamma^2 X_{N'-K}^2. \quad (13)$$

Здесь $\check{x}_i$ — истинное решение, $\hat{x}_i$ — м. н. к.-оценка, K — число неизвестных, знак $\sim$ читается «распределено как». Теперь имеем вместо (3) доверительную область уровня α , определяемую неравенством

$$S(x_i) < \gamma^2 X_{N',\alpha}^2. \quad (14)$$

Преобразуем это неравенство к виду, аналогичному (7):

$$S(x_i) - S(\hat{x}_i) < \gamma^2 X_{N',\alpha}^2 - \frac{1}{2} \gamma^2 X_{N'-K,\alpha}^2. \quad (15)$$

Поскольку мы рассматриваем наихудший случай, примем $\alpha = 50\%$ и заменим медианы на математические ожидания; это дает окончательно

$$S(x_i) - S(\hat{x}_i) \leq \frac{1}{2} \gamma^2 (N' + K). \quad (16)$$

Неравенство (16) и предлагается в качестве практически приемлемого заменителя формулы (7). Ее следствия (8) и (9) корректируются соответственно. Для реальных данных камчатской сейсмической сети принято $\sigma_j = 0,9$ с для P -волн при $\Delta > 150$ км (Гусев, 1974) и $\gamma = 0,65$.

Описанный метод построения области ошибки решения характеризует его абсолютную точность. Определенный интерес представляет и относительная точность решения, т. е. характеристика, определяющая ошибку во взаимном расположении двух близких гипоцентров. Предполагая ошибки годографа медленно меняющимися функциями координат, мы можем при условии фиксации набора станций связать относительную ошибку со случайными ошибками отсчета и идентификации фазы. Моделируя все ошибки суммарно случайными нормально распределенными величинами с дисперсиями σ_j^{*2} , пропорциональными D_j^2 (для простоты), и нулевыми средними, получаем для доверительной области уровня α (Рао, 1968)

$$S(x_i) - S(\hat{x}_i) \leq \gamma_i^2 X_{N'-K,\alpha}^2, \quad (17)$$

где $\gamma_i^2 = \sigma_j^{*2}/D_j^2$. Согласно А. А. Гусеву (1974), для P -волн при $\Delta > 150$ км, $\sigma_j^* \approx 0,45$ с можно принять $\gamma_i = 0,22$. Далее можно построить аналоги формул (8) и (9). Полученная характеристика важна в вопросах оценки размеров афтершоковых зон и т. п.

Отметим, что размеры областей, определяемых неравенствами (7) и (15), при увеличении объема данных не уменьшаются автоматически пропорционально $1/\sqrt{N}$, как это имеет место для области (16). Это важное свойство абсолютной ошибки результата при основной роли систематических ошибок исходных данных и приводит к принципиальной неприменимости в данной задаче статистических оценок типа (16).

Описанные алгоритмы определения гипоцентров землетрясений и оценки точности реализованы в виде программы на языке Фортран/Минск-32. При написании этой программы были использованы элементы алгоритма программы ЭПИ-1 (Пятецкий — Шапиро и др., 1963), а также модифицированной автором версии программы ЭПИ-1, названной «Гипоцентр» (Гусев, 1974). Программа использует геоцентрическую систему координат без поправок на эллиптичность и средний камчатский годограф по С. А. Федотову и И. П. Кузину (Кузин, 1974). При $h > 200$ км и $\Delta > 500$ км используется годограф Джеффриса — Буллена (до $h = 700$ км и $\Delta = 105^\circ$). Интерполяция таблиц годографа биквадратическая. К изложенному ранее алгоритму сделан ряд практических дополнений. Они включают: использование поправок к годографу для станции

Беринг (Кузин, 1974); исключение весового множителя $\omega(r_i)$ для вступлений i , дополнительный вес 0,25 для нечетких (ee) вступлений. Предусмотрена возможность использования разностей $S-P$ при сбоях службы времени. При некоторых землетрясениях наблюдаются плохие вступления на всех станциях сети, при этом невязки могут быть велики по всем станциям одновременно; для такого случая величины D_i автоматически искусственно завышаются.

Результаты обширного экспериментального счета по описанной программе были изучены по внутренним характеристикам и путем сравнения с результатами «ручной» графоаналитической обработки. Было найдено, что программа эффективно заменяет работу интерпретатора и может быть использована при массовой обработке данных. Это позволило с начала 1978 г. перейти на машинную обработку данных камчатской сейсмической сети. Предполагается внедрение программы и в других регионах СССР.

В заключение автор выражает признательность С. А. Федотову за постановку задачи, полезные советы и внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

- Абуталиев Ф. Б., Бутовская Е. М., Плотникова Л. М., Пешкова И. В., Соколова И. А. Определение координат эпицентров на ЭВМ М-20 с последующей оценкой их точности.— В сб.: Применение ЭВМ к решению задач математической физики. Ташкент, «ФАН», 1967, с. 8—109.
- Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление, т. 1. М., «Мир», 1974, 253 с.
- Буллен К. Е. Введение в теоретическую сейсмологию. М., «Мир», 1966, 460 с.
- Гусев А. А. Ошибки определения параметров очагов землетрясений Камчатки.— В сб.: Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск, «Наука», 1974, с. 66—81.
- Гусев А. А., Шумилина Л. С. Геометрия сейсмоактивного объема коры и верхней мантии в районе Камчатки и Командорских островов.— В сб.: Исследования по физике землетрясений. М., «Наука», 1976, с. 194—200.
- Кузин И. П. Фокальная зона и строение верхней мантии в районе Восточной Камчатки. М., «Наука», 1974, 145 с.
- Кондорская Н. В., Желанкина Т. С., Мебель С. С., Варганова Л. Ю. Некоторые результаты применения ЭВМ при обобщении сейсмических наблюдений.— В сб.: Вычислительная сейсмология, вып. 1. М., «Наука», 1966, с. 31—53.
- Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений с многими неизвестными. М., «Мир», 1975, 558 с.
- Пятецкий-Шапиро И. П., Желанкина Т. С., Кейлис-Борок В. И., Павлова Л. Г., Резняковский П. Т. Определение эпицентров землетрясений на цифровой ЭВМ.— Докл. АН СССР, 1963, т. 151, с. 254—257.
- Рао С. Р. Линейные статистические методы и их применения. М., «Наука», 1968, 548 с.
- Ризниченко Ю. В. Методы массового определения координат очагов близких землетрясений и скоростей упругих волн в области расположения очагов.— Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1958, № 4, с. 425—437.
- Федотов С. А., Кузин И. П., Бобков М. Ф. Детальные сейсмологические исследования на Камчатке в 1961—1962 гг.— Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1964, № 9, с. 1360—1378.
- Хемминг Р. В. Численные методы. М., «Наука», 1968, 400 с.
- Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. М., «Мир», 1973, 958 с.
- Bolt B. A., The revision of earthquake epicentres, focal depth and origin times using a high-speed computer.— Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1960, v. 3, p. 433—465.
- Flinn E. A. Confidence regions and error determination for seismic event location.— Rev. Geophys., 1965, v. 3, № 1, p. 157—185.
- Freedman H. Seismological measurement and measurement error.— Bull. Seismol. Soc. Amer., 1968, v. 58, p. 1261—1272.
- James D. E., Sacks S. T., Lazo L. E., Aparicio G. On locating local earthquakes using small networks.— Bull. Seismol. Soc. Amer., 1969, v. 59, p. 1201—1212.
- Jeffreys H. K. Theory of probability. Oxford Press, 1961, 860p.
- Lee W. H. K., Lahr Y. C. HYPO-71 — a computer program for determining hypocentre, magnitude and first motion pattern of local earthquakes.— U. S. Geol. Surv. Open File Rept.

Институт вулканологии
ДВНЦ АН СССР

Поступила
12.VI.1978