

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

© 1997 г. А. М. Аветисян, А. Г. Манукян, Р. Х. Матевосян

Институт геофизики и инженерной сейсмологии НАН РА
377515 Гюмри, ул. Ленинградяк, 5, Республика Армения
Поступила в редакцию 29.02.96.

Рассматривается задача определения параметров землетрясений на территории Республики Армения. Для решения поставленной задачи используется метод наименьших квадратов. Полученная в результате линеаризации задачи система уравнений относится к числу плохо обусловленных, поэтому регуляризованные решения находятся с помощью итерационного метода Гаусса-Ньютона.

В результате обработки данных ряда зарегистрированных сейсмическими станциями региона землетрясений определены координаты гипоцентров, времени в очаге и скорости сейсмических волн с оценками точности их определения.

Процесс подготовки и возникновения землетрясений тесно связан с внутренним строением Земли, в которой распространяются порождаемые землетрясением сейсмические волны. Изучение внутреннего строения Земли предполагает знание координат источника сейсмических волн. А для большинства методов определения координат очага землетрясений необходимо знание теоретического времени распространения волн. Допускаемая двойная ошибка (одна в отношении источника, другая в отношении среды) может привести к согласующимся с наблюдениями результатам [3, 4].

С целью увеличения точности определения параметров землетрясений возникает вопрос совершенствования методов их решения, что составляет важную проблему на протяжении всего периода инструментальной сейсмической регистрации в любом регионе.

Преимущества аналитического метода решения проблемы для территории РА показаны в работе [2]. Результаты в целом свидетельствуют о необходимости перехода от ручной к машинной обработке с целью повышения точности определения координат землетрясений.

С другой стороны, при решении одной и той же задачи существуют различные алгоритмы, которые дают вовсе не одинаковые результаты, поэтому очень важно получить оценку точности определения каждого отдельного параметра.

Постановка и алгоритм решения задачи изложены в работе [1], сущность которых заключается в следующем: для определения основных параметров землетрясений РА используются моменты вступления прямых сейсмических волн p и s . Задача решается путем минимизации суммы квадратов невязок теоретических T и наблюдаемых t времен пробега сейсмических волн.

Пусть k -ое землетрясение с координатами очага $X(\varphi_k, \lambda_k, h_k)$ зарегистрировано n сейсмическими станциями с координатами $y(\varphi_i, \lambda_i)$; $i = \overline{1, n}$. Условные уравнения, связывающие измеренные и теоретические времена вступлений, имеют вид:

$$t_i = T(x_k, y_i) + \varepsilon_i; \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где t_0 время возникновения k -го землетрясения.

Разница между измеренным и теоретическим временем вступления обычно носит случайный характер, то есть

$$E\varepsilon_i = 0, \quad E\varepsilon_i^2 \varepsilon_k = \sigma_i \delta_{ik}, \quad \sigma_i = \sigma(T_i). \quad (2)$$

Для решения задачи (1) — (2) обычно используется оценка метода наименьших квадратов [2, 3]:

$$\hat{x} = \operatorname{argmin} Q(x), \quad Q(x) = \sum_{i=1}^n [\sigma_i^2 |t - T(x_i, y)|^2].$$

Как известно, выражающие связь геофизических наблюдений с параметрами среды уравнения оказываются, чаще всего, нелинейными. Разложив функцию $T(x_k, y)$ в ряд Тейлора до членов первого порядка, получим систему линейных уравнений

$$Ax = b, \quad (3)$$

где x -вектор приращений параметров среды, A -матрица частных производных функции $T(x_k, y)$, b -вектор разностей между наблюдаемыми и расчетными данными, полученными для начальной модели среды.

Исходные данные системы (3) известны приближенно и поэтому рассматриваемая задача относится к некорректно поставленным геофизическим задачам [5]. Регуляризованное решение задачи получается применением модифицированного метода Гаусса-Ньютона

$$x_{n+1}^* = x_n^* - (AA^* + \beta_n \beta)^{-1} A^* (Ax_n^* - b),$$

где A^* — оператор, сопряженный с оператором A , β — линейный самосопряженный, положительно определенный оператор.

Для оценки точности решения системы (3) вычисляются средние квадратические ошибки единицы веса и средние квадратические ошибки

$$P_i = \frac{D}{D_i}, \quad r_i = \frac{r_n}{\sqrt{P_i}},$$

где D — определитель матрицы A , D_i — алгебраические дополнения определителя D .

На каждом шаге итерации проверяется условие

$$\Delta t_i \leq 3P_i. \quad (4)$$

Если оно не выполняется, то соответствующей станции присваивается нулевой вес и задача решается заново.

Начальные приближения для итерации задаются следующим образом. Значения времени в очаге определяются по формуле

$$t = t - \frac{7}{3} (t_s - t_p), \quad (5)$$

где t_s и t_p — моменты вступления прямых и поперечных волн, зарегистрированных на одной из ближайших станций. Начальные значения скорости и глубины очага определяются как средние значения для региона РА: $V = 6,4$ км/сек и $H = 10$ км. Значения φ_0 и λ_0 вычисляются по начальным значениям V_0 и t_0 .

Решение задачи на ЭВМ осуществляется при двух значениях признака: $ПР = 0$ и $ПР = 1$, что соответствует нахождению оптимального решения по минимуму функционалов

$$F_1 = \sum_{i=1}^n t_i^2, \quad F_2 = \sum_{i=1}^n x_i^2.$$

Функционал F_1 соответствует времени пробега сейсмической волны, а F_2 — среднеквадратической ошибке решения.

Таблица 1

Результаты обработки данных некоторых землетрясений

Дата зем-нии	t_p	t_s	a_0	β	Пр	t_0	V_0	φ_0	λ_0	h_0
11.03.73 Богдановка, Бакурнани, Степанаван, Ереван, Гори, Они, Зугдиди, Цебелда, Лагодехи, Кировабад, Тбилиси, Хашури	20.8	26.4	$2E+7$	0.99	0 По кат. Решение Вер. хар.	13.30 13.33 0.0005	— 6.40 0.0005	41.37 41.27 0.0004	44.03 43.92 0.0004	10.00 10.00 0.0001
25.02.78 Сочи, Кармракар, Ереван, Варденис, Степанаван, Тбилиси, Ленинанкан, Лагодехи, Горис, Пятигорск, Они, Шеки	26.0	30.5	$2E+6$	0.9	0 По кат. Решение Вер. хар.	20.10 20.00 0.0076	— 6.44 0.0076	40.20 40.09 0.0006	44.40 44.39 0.0007	— 10.02 0.0008
17.03.93 Горис, Степанаван, Мецамор, Ереван, Варденис, Арарат, Иджеван	44.0	66.0	$1E+5$	0.99	0 По кат. Решение Вер. хар.	15.60 14.66 0.0180	— 6.42 0.0180	38.47 38.37 0.0008	44.83 45.68 0.0023	— 9.94 0.0183
07.01.93 Ахалкалаки, Ленинанкан, Бавра, Горис, Ереван, Степанаван, Арарат, Гарни, Паракар, Тбилиси, Варденис	85.3	105.0	$2E+7$	0.93	0 По кат. Решение Вер. хар.	59.00 59.03 0.0801	— 6.45 0.0787	40.20 40.16 0.0021	42.20 41.89 0.0009	— 10.00 0.0806
27.06.73 Ленинанкан, Степанаван, Ахалкалаки, Бакурнани, Кировабад, Гегечкори, Махачкала, Они, Тбилиси, Лагодехи	37.0	42.0	$2E+6$	0.90	1 По кат. Решение Вер. хар.	30.20 30.34 0.217	— 6.45 0.214	41.10 41.03 0.006	43.90 43.83 0.007	10.00 10.05 0.021
02.03.93 Горис, Варденис, Ереван, Степанаван, Ленинанкан	67.0	80.8	$8E+5$	0.96	0 По кат. Решение Вер. хар.	47.50 48.60 0.022	— 6.46 0.021	38.70 38.65 0.001	45.60 45.30 0.002	— 10.00 0.022
20.03.93 Бавра, Степанаван, Ленинанкан, Ереван, Варденис, Горис, Арарат, Ахалкалаки, Тбилиси	66.2	72.0	$2E+6$	0.8	1 По кат. Решение Вер. хар.	57.60 58.48 0.210	— 6.20 0.177	41.27 41.33 0.001	44.05 44.00 0.001	— 9.95 0.241
27.01.93 Горис, Арарат, Ереван, Варденис, Степанаван, Тбилиси	28.0	46.0	$2E+4$	0.9	1 По кат. Решение Вер. хар.	4.00 4.02 0.151	— 8.04 0.149	38.50 38.03 0.001	45.20 45.39 0.003	20.00 10.02 0.151
05.03.93 Горис, Степанаван, Мецамор, Ереван, Варденис, Арарат	65.0	83.0	$1E+6$	0.8	0 По кат. Решение Вер. хар.	39.90 41.00 0.033	— 6.42 0.032	38.32 38.39 0.001	45.65 45.83 0.002	— 10.00 0.033
01.01.93 Арарат, Варденис, Степанаван, Ереван, Мецамор, Иджеван, Горис, Каджаран, Тбилиси	57.5	62.6	$2E+5$	0.9	0 По кат. Решение Вер. хар.	49.80 50.70 0.006	— 6.40 0.006	39.83 39.97 0.001	45.10 45.19 0.001	20.00 10.00 0.006
09.01.93 Бавра, Степанаван, Каджаран, Ереван, Варденис, Горис, Тбилиси	39.6	43.6	$2E+3$	0.99	1 По кат. Решение Вер. хар.	35.90 34.38 0.069	— 6.01 0.067	40.30 40.37 0.001	45.90 45.97 0.001	— 10.05 0.059
10.01.93 Иджеван, Степанаван, Ленинанкан, Ереван, Варденис, Горис, Арарат, Ахалкалаки, Тбилиси, Каджаран	36.0	42.0	$8E+2$	0.5	1 По кат. Решение Вер. хар.	27.60 27.55 0.689	— 7.00 0.351	39.50 39.50 0.001	45.57 45.66 0.001	— 9.99 0.799

Оптимальное решение выбирается по минимуму соответствующих значений ошибок.

Параметр регуляризации на каждом шаге определяется соотношением

$$z_{i0} = z_i \beta, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

Нулевые значения параметров регуляризации a_0 и β для различных задач различные. Они уточняются методом подбора.

Результаты определения основных параметров ряда землетрясений приведены в таблице 1.

В левую часть таблицы входят дата землетрясения, названия сейсмических станций, значения времен t_0 и t_p , параметров a_0 и β , а также признака ПР. В правую часть входят значения параметров t_0 , v_0 , φ_0 , λ_0 , h_0 по каталогу, полученные по программе их решения, и соответствующие оценки точности.

После анализа полученных результатов приходим к следующим выводам.

1. Параметры φ и λ эпицентра землетрясений по сравнению с другими определяются с высокой точностью.

2. Глубины очагов землетрясений по наблюдениям региональной сети пока не находят надлежащего решения. Поэтому возникает вопрос необходимости разработки более совершенных алгоритмов, позволяющих существенно улучшить сеть сейсмического наблюдения.

3. Время в очаге определяется более надежно. Поэтому, не усложняя алгоритм решения задачи, в большинстве случаев можно вычисление ее значений произвести по формуле (5).

4. Точность определения значений скоростей сейсмических волн в разных районах региона довольно различаются. Поэтому, учитывая сейсмические особенности района, необходимо заново и более точно решить задачу распределения скоростей сейсмических волн.

5. Несмотря на полувековую историю методики определения основных параметров землетрясений, задача для каждого отдельного землетрясения имеет индивидуальный, довольно сложный характер. Оценка погрешностей позволяет решить вопрос эффективности сейсмической сети как в целом, так и учитывая влияния наблюдений отдельных станций на точность определяемых значений параметров землетрясений в разных районах региона.

ԵՐԿՐԱՇԱՐԺԵՐԻ ՀԻՄՆԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

Ա. Մ. Ավետիսյան, Ա. Գ. Մանուկյան, Ռ. Խ. Մաթևոսյան

Ա մ ֆ ո ֆ ո լ մ

Գիտարկվում է երկրաշարժերի հիմնական պարամետրերի որոշման խնդիրը, որի լուծման համար օգտագործվում է փոքրագույն բառակուսիների մեթոդը: Կիրառելով գծայնացման մեթոդը՝ ստացվում է հավասարումների համակարգ, որը պատկանում է վատ ապահովված երկրաֆիզիկական խնդիրների դասին: Համակարգի ռեգուլյարիզացված լուծումները գտնելու համար օգտագործվում է Գաուս-Նյուտոնի իտերացիոն մեթոդը:

Նշված մեթոդով մշակված են մի շարք երկրաշարժերի տվյալներ, որոնց համար որոշված են օջախի ժամանակը, կոորդինատները և սեյսմիկ ալիքի արագությունը՝ յուրաքանչյուրի ճշտության ստատիստիկական գնահատականով: Ելակետային հուսարի տվյալների դեպքում առաջարկված ալգորիթմը տալիս է բավականին լավ արդյունքներ:

DETERMINATION OF EARTHQUAKE'S BASIC PARAMETERS

A. M. Avetisyan, A. G. Manoukyan, R. Kh. Matevosyan

Abstract

A problem for determination of an earthquake's parameters in the territory of Armenia is considered. The method of least squares is used in solving of this problem. The set of equations obtained in the result of the problem linearization is an ill-conditioned one that is why solutions were found by means of the Gauss-Newton iteration method.

The processing of data of a series of earthquakes recorded at the seismic stations located in the region allowed to determine hypocenters' coordinates, time in focus and seismic waves' velocities together with the estimates of corresponding accuracy.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аветисян А. М., Манукян А. Г. Метод одновременного определения координат гипоцентров землетрясений, времени в очаге и скоростей сейсмических волн.— ДАН АрмССР, 1989, т. 88, № 5, с. 208—211.
2. Аветисян А. М., Оганесян Н. В. Сравнение результатов определения координат модельных землетрясений при ручном и машинном методах обработки.— Изв. АН АрмССР, Науки о Земле, 1987, № 1, с. 71—75.
3. Белобородов В. Б. Интерактивная система статистического анализа сети сейсмических станций на персональной ЭВМ. Препринт № 947. Новосибирск, 1992, с. 3—7.
4. Голенецкий С. Н., Перевалова Г. И. Результаты определения гипоцентров землетрясений Байкальской зоны на ЭВМ и проблема оценки погрешностей. В кн.: Сейсмотектоника и сейсмичность района строительства БАМ. М.: Наука, 1980, с. 101—112.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: 1974, 224 с.