*Известия НАН РА, Науки о Земле, 2012, 65, № 3, 70-77*

# ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

**© 2012 г. А. М. Аветисян, В. Ю. Бурмин, А. Г. Манукян**

*Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА,*
*Армения 3115, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна 5,*
*E-mail: Avet.andrey@mail.ru*
*Институт Физики Земли, Российская Федерация, г. Москва, Б. Грузинская 6*
*E-mail: vburmin@yandex.ru*
*Гюмрийский государственный педагогический институт им. М. Налбандяна,*
*Армения 3126, г. Гюмри, ул. П. Севака 4*
*E-mail: pedinst@shte.am*
*Поступила в редакцию 28.09.2012 г.*

В работе исследуются основные общеметодологические принципы теории и практики интерпретации сейсмологической информации.

Исследуется математическая модель интерпретации сейсмического поля для анализа разрешающих способностей различных методов и алгоритмов, изучения закономерностей влияния среды и характерных особенностей сейсмического поля в конкретных случаях. Полученные результаты позволяют с большей объективностью и точностью провести количественный анализ параметров сейсмичности исследуемой территории и, следовательно, более эффективно решить многие актуальные задачи современной сейсмологии и правильно оценить сейсмическую опасность.

Основу интерпретации экспериментальных сейсмических данных, которые дают наиболее полные и достоверные представления о внутреннем строении Земли, сейсмичности и современных тектонических процессах, протекающих в ее недрах, составляют обратные кинематические задачи сейсмологии. Определение координат гипоцентров землетрясений относится к числу обратных кинематических задач и является одной из основных проблем экспериментальной и теоретической сейсмологии. Ее актуальность определяется потребностями экспериментальной сейсмологии, сейсморайонирования, сейсмотектоники, инженерной сейсмологии, предсказания землетрясений, глубинных сейсмических исследований и т. д. Определение координат гипоцентров землетрясений связано с двумя самостоятельными задачами: анализом исходной системы уравнений, который приводит к рассмотрению различных задач оптимального размещения сейсмических станций (задачи планирования сейсмологического эксперимента), и построением оптимальных алгоритмов определения координат гипоцентров землетрясений при различных исходных данных.

Определения параметров гипоцентров землетрясений разными службами, методами, по разным годографам и системам наблюдений дают различные результаты, как для отдельных землетрясений, так и в среднем для района (Аветисян и др., 1989; Аветисян и др., 2011).



Для преодоления вышеизложенных трудностей при определении координат гипоцентров землетрясений авторами статьи исследован ряд теоретических и практических задач, обеспечивающих эффективную обработку сейсмологической информации (Бурмин, 1986; 1995; 2012; Аветисян и др., 1982; Аветисян и др., 1999; Бурмин и др., 2004).

Основные общеметодологические принципы теории и практики интерпретации сейсмологической информации целесообразно разбить на следующие этапы:

1. параметризация модели интерпретации
2. теоретическое моделирование землетрясений
3. оценка методов определения координат гипоцентров на теоретических моделях при различных данных
4. анализ исходной системы наблюдений
5. разработка алгоритма определения координат гипоцентров близких землетрясений в неоднородных трехмерных средах (Бурмин и др., 2004).

## 1. Параметризация модели интерпретации

Экспериментальные данные и аналитические формулы, участвующие при построении модели интерпретации сейсмического поля, содержат ошибки разных видов и точности. Следовательно, параметризация исходных данных представляет собой один из принципиально важных аспектов и необходимых этапов для построения адекватной модели рассматриваемого сейсмологического процесса.

Уравнение, связывающее координаты гипоцентров землетрясения и наблюдательной системы, регистрирующей землетрясения сейсмологических станций, имеет вид

$$t_i \approx T_i(X, x_i) + t_0, i = 1,2,3,...$$

где $X = (\chi, \lambda, h)$ - координаты очага землетрясений.

$x_i = (\varphi_i \lambda_i h_i)$ - координаты сейсмологических станций, регистрирующих землетрясения,

$t_0$ - время возникновения землетрясений,

$t_i$ - время вступления сейсмологической волны на i-ю станцию,

$T_i$ - теоретическое время пробега сейсмической волны от очага до i-ой станции.

В зависимости от постановки задач, геолого-геофизической изученности и особенностей исследуемой области рассматриваются следующие задачи: определение 1) $x$, 2) $x$ и $t_0$, 3) $x$ и $\upsilon$, 4) x, $\upsilon$ и $t_0$.

Решения поставленных задач сводятся к системе нелинейных уравнений с приближенными исходными данными.

Решение нелинейных уравнений обычно представляет трудности и во избежание нелинейного интерпретационного процесса в связи со сложностью вычислений, иногда приводит к естественному желанию пожертвовать точностью ради того, чтобы можно было использовать мощный аппарат линейной алгебры. Последний дает возможность оценить точность отдельных параметров, получить средние квадратичные ошибки неизвестных, а также, в некоторых случаях, найти доверительные интервалы неизвестных, полученных в результате линеаризации.

Полученная таким образом система линейных уравнений $Ax = b$ относится к числу плохо обусловленных систем. Следовательно, имеем дело с обычной некорректно поставленной задачей геофизики.

Из регуляризующих итерационных процессов решения некорректно поставленных задач хорошими вычислительными свойствами обладает модифицированный метод Гаусса-Ньютона

$$x_{n+1}^{(\alpha)} = x_{n+1}^{(\alpha)} - (A^*A + \lambda_n\beta)^{-1}A^*(Ax_n^{(\alpha)} - b).$$

Для оценки точности решения системы вычисляем средние квадратичные ошибки на единицу веса по формулам:

$$P_\varphi = \frac{D}{D_\varphi}, P_\lambda = \frac{D}{D_\lambda}, P_h = \frac{D}{D_h}, P_v = \frac{D}{D_v}, P_t = \frac{D}{D_t},$$

где D является определителем матрицы $A$, а $D_\varphi, D_\chi, D_h, D_\upsilon, D_t$- алгебраические дополнения элементов $\chi$, $\varphi$, h, $\upsilon$, t определителя D. Средние квадратичные ошибки параметров определяются по формулам:

$$\sigma_\varphi = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P_\varphi}}, \sigma_\lambda = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P_\lambda}}, \sigma_h = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P_h}}, \sigma_v = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P_v}}, \sigma_t = \frac{\sigma_0}{\sqrt{P_{\varphi_t}}}.$$

$$\sigma_0 = \frac{\sum_{i=1}^{n}[T_i(x) + t_0 - t_1]^2}{n - N},$$

где $N$- число определяемых параметров.

При небольшом количестве станций, зарегистрировавших землетрясения, можно определить доверительные интервалы определяющих величин, основываясь на распределении Стьюдента для заданной доверительной вероятности.

Для полученных систем необходимо также исследовать корректность поставленной задачи, т. е. число обусловленности матрицы, так как величина Cond(K) играет весьма существенную роль в решении систем линейных алгебраических уравнений. Как показано в работе (Бурмин, 2012), ограниченность величины Cond(K) является необходимым и достаточным условием корректности задачи.

Доказано, что для того чтобы задача $Ax = b$ - где А квадратная матрица, была корректна в смысле Адамара, необходимо и достатоочно, чтобы величина

$$Cond(A) \le M < \infty.$$

Таким образом, число обусловленности достаточно глубокой характеристики систем линейных алгебраических уравнений и требование минимальности $Cond(A)$ приводят к повышению устойчивости решения системы.



Данный алгоритм позволяет параметризировать исходные данные и построить адекватную модель интерпретации исследуемого сейсмического поля.

**2. Теоретическое моделирование землетрясений и оценка методов определения координат гипоцентров на теоретических моделях при различных данных**

Для определения координат гипоцентров землетрясений известно много различных алгоритмов и методов. По существу, в основе всех известных методов определения координат гипоцентров землетрясений лежит стремление свести невязку времени (отклонение теоретических времен пробега сейсмических волн от наблюденного) к минимальному значению. Но так как теоретическое время вычисляется в большинстве случаев приближенно, то точное решение приближенной задачи не всегда сводится к точному решению исходной задачи, если не предполагать выполненным требование устойчивости вычислительного процесса.

Таким образом, даже для корректно поставленных задач при их приближенном решении стремление к максимальному уменьшению невязки может оказаться ошибочным.

В этих условиях становится важной задача выбора оптимального алгоритма.

Классический способ сравнения с точным решением, т.е. для нашего случая, - анализ ситуаций, когда положение гипоцентра заведомо точно известно.

Такая ситуация может иметь место в двух случаях:

-в полевых экспериментах с взрывами,

-при численном моделировании.

Численное моделирование, хотя и уступает в известной степени физическому эксперименту, тем не менее, обладает рядом неоспоримых достоинств.

В работе (Аветисян и др., 1989) рассматривается простейшая модель землетрясений с точечным источником, где можно исследовать изменение времен пробега сейсмических волн в лучевом приближении в зависимости от геометрических и механических характеристик среды.

Оно экономически целесообразно, менее трудоемко, дешевле и позволяет изучить по единой методике много различных вариантов.

Мы рассматриваем кинематическую задачу распространения волны, т.е. будем исходить из основных уравнений геометрической сейсмики.

Лучевая задача распространения волн в среде с заданным полем скоростей сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений

$$\dot{X}_i = v(x)d_i(x),$$

$$\alpha = -\frac{1}{v(x)}\frac{\partial v(x)}{\partial x}$$

с начальными условиями

$$x_i(0) = x_{0i},\ \alpha_{0i} = \frac{n_0}{V(x_{0i})} = \left(\frac{\cos\varphi_0}{V_0}, \frac{\sin\varphi_0}{V_0}\right),$$

где $x_i$ - декартовые координаты точек сейсмического луча, $V_0$ - скорость в точке $x_{0i}$, $n_i$-единичный касательный вектор к лучу,

$\alpha_i = \frac{n_i}{V}$, $\frac{n_i}{V}, \varphi_0$ -угол между осью $x_3$ и направление луча, точка означает дифференцирование по времени.

Для полупространства $x>0$, $V = b + ax$ вышеприведенное дифференциальное уравнение имеет точное решение в элементарных функциях.

Решая систему, получим функциональную зависимость расстояния от времени, т.е. уравнение годографа

$$\Delta = \frac{b}{a}\sqrt{2\left(1 - \frac{a}{b}z_0\right) ch\,at - \left(1 + \frac{a}{b}z_0\right)^2}.$$

По предложенной методике с помощью различных алгоритмов определяется положение гипоцентра землетрясения и сравнивается с точными значениями.

Предложенная методика позволяет:

1) при определенных условиях выбрать конкретный способ или алгоритм, который при определении координат гипоцентра более надежен. Оценить влияние случайных ошибок наблюдений на окончательный результат;

2) найти границу отношения глубины гипоцентра к эпицентральному расстоянию, до которой алгоритм достаточно эффективно вычисляет глубину гипоцентра;

3) оценивать методы вычисления распределения скоростных разрезов;

4) проверить надежность современных площадных годографов и трехмерных скоростных моделей.

**3. Анализ исходной системы наблюдений**

Методика оптимизации систем сейсмических наблюдений опубликована в работах (Аветисян и др., 1982; Бурмин, 2012). По этой методике построена оптимальная система наблюдений Таджикской Республики, Вьетнама, Республики Армения и Кавказа. Очевидно, что эффективность сети наблюдений зависит не только от числа станций и взаимного расположения их между собой и всей сети относительно гипоцентра, но и от силы землетрясений.

С помощью разработанных методов приводится оценка эффективности систем сейсмологических наблюдений, даются рекомендации по повышению эффективности систем наблюдений. В итоге проведенных исследований получено распределение ошибок в определении эпицентральных расстояний, глубины и времени в очаге при k=8 и k=10 для



существующей сети РА, получены отдельные области, где точность определения координат гипоцентра выше, чем в остальных.

Дана оценка по всей территории республики, которая позволяет при решении многих задач сейсмологии оценить точность исходных данных.

Оценена также представительность сети сейсмологических наблюдений республики. Показано, что рассматриваемая в работе сеть без пропусков регистрирует землетрясения 10 классов или магнитуды 3,5 и более.

**4. Алгоритм определения координат гипоцентров землетрясений в неоднородных средах**

Разработан алгоритм определения координат гипоцентров близких землетрясений в неоднородных трехмерных средах (Бурмин др., 2004).

В сейсмологической практике при определении координат гипоцентра в качестве последнего принимается точка из некоторой области S, которая реализует минимум функционала невязки времен:

$$S_t = \sum_{i=1}^{n}(t_i - \tilde{t}_i)^2,$$

где $t_i$ и $\tilde{t}_i$ - теоретические и наблюденные времена пробега сейсмических волн от очага до регистрирующих станций. Если задаться уровнем погрешности $\delta t$, то тем значениям функционала $S_t$, для которых, например $\sqrt{\frac{S}{n}} \le \delta\tau$, будет соответствовать некоторая область $\theta$ в пространстве координат $x$, $y$, $z$, точками которой являются координаты гипоцентров, соответствующие теоретическим временам $t_i$. Далее, если для каждой точки из области $S$ определить значения $v_i$, подставить их в правую часть исходной системы уравнений и решить систему, то получим значения $X$, $Y$, $H$, которые в общем случае будут отличаться от координат соответствующих точек из S; для некоторых точек это отличие может быть значительным.

Пусть $R_i$, $D_i$ и H соответствуют теоретическим временам $t_i$ пробега сейсмических волн от очага до $i$-й станции, где $R_i = v_i t_i$ - гипоцентральные расстояния; $D_i = \sqrt{R_i^2 - H^2}$ - эпицентральные расстояния и H - глубина очага землетрясения; $r_i = u_i\hat{t}_i$, $d_i$ и h - те же величины, но соответствующие истинному положению гипоцентра ($u_i = v_i - \delta v_i$). Тогда для функционала $S_t$ можно записать

$$S_t = \sum_{i=1}^{n}(t_i - \hat{t}_i - \delta\tau_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} v_i^{-2}(v_i t_i - v_i\hat{t}_i - v_i\delta\tau_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} v_i^{-2}(R_i - r_i - \delta r_i)^2$$

$$= \sum_{i=1}^{n} v_i^{-2}[(D_i - d_i)^2 + (H - h)^2 - \sigma_i] \le \sum_{i=1}^{n}\gamma_i(D_i - d_i)^2 + Y(H - h)^2 = S$$

где $D_i$, $H$ и $d_i$, $h$ - эпицентральные расстояния и глубины, соответствующие теоретическим и наблюденным временам пробега сейсмических волн; $\gamma_i=v_i^{-2}$ и $\rho = \sum_{i=1}^{n} v_i$ -весовые множители, характеризующие неоднородность среды. Из полученного соотношения следует, что малость значения функционала $S_t$ не гарантирует малости значений функционалов невязок при определении глубины гипоцентра землетрясения и эпицентральных расстояний, но малость значения функционала $S$ влечет за собой малость значения функционала невязки времен. Это утверждение - следствие того факта, что квадрат разности $(R_i\text{-}r_i)^2$ суть квадрата разностей модулей векторов $R_i$ и $r_i$ и не зависит от их направлений, в то время как сумма квадратов разностей $(D_i\text{-}d_i)^2 +(H\text{-}h)^2$ есть квадрат модуля разности $R_i$- $r_i$ соответствующих векторов.

С помощью полученных результатов мы можем не только проанализировать существующие алгоритмы и способы решения обратных задач геометрической сейсмики, но и рассмотреть общие вопросы постановки задачи, формулировать условия существования решения с оценкой устойчивости полученных параметров и их единственности. Следовательно, они позволяют с большей объективностью провести количественный анализ параметров сейсмичности исследуемой территории, более эффективно решать многие актуальные задачи современной сейсмологии, в частности, оценки сейсмической опасности и риска, задачи структурной сейсмологии и ряда других, актуальных для РА прикладных задач геофизики.

## ЛИТЕРАТУРА

**Аветисян А. М., Добровольский И. П.** Об оценке эффективности методов определения координат гипоцентров землетрясений на теоретических моделях. Доклады АН АрмССР, 1982, N 2, с. 91-93.

**Аветисян А. М., Добровольский И. П., Оганесян Н. В.** Применение конкретных методов определения координат землетрясений на моделях. Известия АН, АрмССР, Науки о земле, 1984, N 4, с. 60-69.

**Аветисян А. М., Манукян А. Г.** Метод одновременного определения координат гипоцентров землетрясений, времени в очаге и скоростей сейсмических волн. Доклады АН АрмССР, 1989, т. 88, с. 208-211.

**Аветисян А. М., Манукян А. Г**. Особенности обработки сейсмологической информации и основные пути повышения их эффективности. Сборникн научных трудов ИГИС НАН РА им. А.Назарова, 2011, с. 15-23.

**Бурмин В.Ю**. Оптимальное расположение сейсмических станций при регистрации близких землетрясений. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1986, N 5, с. 34-42.

**Бурмин В. Ю.** Оптимизация сейсмических сетей и определение координат землетрясений. Российская АН, Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта, Москва, 1995, с. 30-49.

**Бурмин В. Ю.** Планирование оптимальных сейсмических и акустических сетей наблюдений. Нестатистический подход. Palmarium Academic Publishing. Saarbrücken. Germany, 2012, p. 121-128.

**Бурмин В. Ю., Аветисян А. М., Геворкян К. В**. Определение координат гипоцентров близких землетрясений в неоднародных трехмерных средах. Сборник трудов восьмых геофизических чтений им. В.В. Фединского, Изд. «Герс», Москва 2004, с. 330-333.

**Бурмин В. Ю., Аветисян А. М., Геворкян К. В**. Анализ исходных данных региональной сейсмологической сети Кавказа и построение по ним осредненной скоростной кривой. Вулканология и сейсмология, Москва, 2006, с. 114-123.

**Джибладзе Э. А., Дарахвелидзе Л. К., Табуцадзе Ц. А**. Магнитуды и энергетическая классификация землетрясений. Москва, 1984, т. II, с. 125-132.

**Avetisyan A. M., Bourmin V. U., Fong N. N.** Optimal seismological network designing by the example of Armenia. Third International conference on seismology and earthquake engineering see - 3 Proceedings, volume I, May 17-19, 1999, Tehran, Iran, p. 175-182.