



DETERMINATION OF COORDINATES OF SEISMIC WAVE SOURCE BY AMPLITUDE METHOD OF PASSIVE LOCATION

V. D. Syten'ky

Taganrog Institute of Technology, Southern Federal University, Taganrog, Russia

Abstract: The paper presents results of the mathematical synthesis of the method of passive location of a seismic wave source. The method employs measurements of regular attenuation of seismic oscillation amplitudes. If it is impossible to determine the location of a seismic event by means of direct measurements, indirect measurements are needed. A priori information for the mathematical synthesis was obtained from functional equations showing inverse proportions of measured amplitudes, arbitrary effective attenuation coefficients and corresponding coordinates. An original method was applied to process the data. The method providing for passive location of seismic waves sources has been developed; it is called the radial basic method. In the one-dimensional case, a distance is determined on the basis of seismic oscillation amplitudes measured by two seismographs that are located at a known base distance coinciding with the direction to the source of seismic waves. The distance is calculated from the receiver that is nearest to the source. If the base distance and the direct line between the seismograph and the seismic wave source do not coincide, a projection of the distance between the receivers to the given straight line is taken into account.

Three seismographs were placed at mutually perpendicular base distances in a plane (i.e. the two-dimensional space). This allowed us to obtain an analytical equation for determining the direction to the seismic wave source using measured amplitudes. The value of the angle is taken into account when calculating the distance.

For the seismic wave source located in the three-dimensional space, transition equations for combined coordinate systems (i.e. the Descartes (Cartesian)), at the axes of which the seismographs were placed, and the spherical coordinate systems were applied, and analytical equations were obtained for determination of coordinates, such as distance/polar radius, elevation angle/latitude, and bearing angle/longitude.

To analyze the application of the radial basic method of passive location, an absolute error resulting from indirect measurement was calculated. This method is a special case of determining the statistical characteristics of the sought function (coordinates) out of random values, which are the measured amplitudes of seismic oscillations. In the obtained analytical expressions for determination of the mean square deviation of the distance and direction to the seismic wave source, noise from seismographs is taken into account, as well as external noise manifested as microseisms and other interfering seismic waves. For the three-dimensional space, equations are derived for calculation of RMS distance, elevation and bearing angles.

In cases where distances to seismic wave sources, directions, coefficients that factor properties of the medium, and base distances are known, the radial basic method allows us to determine effective coefficients of seismic wave attenuation and capacities of seismic wave sources.

Key words: seismic wave source, passive location, radial basic method, noise, mean square deviation.

Recommended by V.A. San'kov 2 November 2012

Citation: Syten'ky V.D., 2012. Determination of coordinates of seismic wave source by amplitude method of passive location. *Geodynamics & Tectonophysics* 3 (4), 409–416. doi:10.5800/GT-2012-3-4-0082.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН АМПЛИТУДНЫМ МЕТОДОМ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

В. Д. Сытенький

Технологический институт Южного Федерального университета, Таганрог, Россия

Аннотация: В статье приводятся результаты математического синтеза метода пассивной локации источника сейсмических волн, основанного на измерении закономерного затухания амплитуды сейсмических колебаний. Невозможность получения информации о местоположении сейсмического явления непосредственными измерениями вызывает необходимость проведения косвенных измерений. Априорной информацией для математического синтеза метода послужили функциональные связи, носящие обратно пропорциональную зависимость между измеряемыми амплитудами с произвольным эффективным коэффициентом затухания и соответствующими параметрами координат, что позволило применить определенную методику обработки результатов. В работе приведено утверждение, в соответствии с которым получен метод пассивной локации источника сейсмических волн, названный радиально-базовым. В одномерном варианте определение дальности осуществляется при измерении амплитуд сейсмических колебаний двумя приемниками сейсмических волн, отстоящими друг от друга на известном базовом расстоянии, совпадающем с направлением на источник. Отсчет дальности производится от ближайшего к источнику сейсмоприемника. При несовпадении базового расстояния и прямой линии, соединяющей ближайший приемник с источником сейсмических волн, учитывается проекция расстояния между приемниками на эту линию.

Расположение трех сейсмоприемников с взаимно-перпендикулярными базовыми расстояниями на плоскости (двумерное пространство) позволило получить аналитическое выражение для определения направления на источник сейсмических волн по измеренным амплитудам. Значение угла учитывается при вычислении дальности.

Для расположенного в трехмерном пространстве источника сейсмических волн с помощью формул перехода при совмещенных системах координат – декартовой, на осях которой находятся сейсмоприемники, и сферической – получены аналитические выражения для определения параметров координат: дальность (полярный радиус), полярный угол и азимутальный угол.

Анализ радиально-базового метода пассивной локации осуществлен в виде расчета абсолютной погрешности, возникающей при косвенных измерениях. Он является частным случаем определения статистических характеристик искомой функции (параметры координат) от случайных величин, которыми являются измеряемые амплитуды сейсмических колебаний. Полученные аналитические выражения для определения среднеквадратического отклонения дальности и направления на источник сейсмических волн учитывают как шумы приемных устройств, так и внешние помехи в виде микросейсм и других мешающих сейсмических волн. Для трехмерного пространства выведены формулы, по которым рассчитываются среднеквадратические значения дальности, полярного угла и азимутального угла.

При известном расстоянии до источника сейсмических волн, направлении на него, коэффициентах, учитывающих свойства среды, и известном базовом расстоянии радиально-базовый метод позволяет определить эффективный коэффициент затухания сейсмических волн и мощность источника.

Ключевые слова: источник сейсмических волн, пассивная локация, радиально-базовый метод, шум, среднеквадратическое отклонение.

1. ВВЕДЕНИЕ

Определение координат очагов землетрясений, взрывов различного рода и других механических воздействий в водных акваториях и горных породах представляется актуальной задачей. Основным источником информации о подобных событиях являются возникающие при этом сейсмические волны. Для определения координат источников сейсмических волн традиционно применяется фазовый метод. Многочисленные преломляющие и отражающие границы в толще земной коры, а также возникающие вторичные волны неопределенной поляризации изменяют направление волнового фронта. Существуют также источники сейсмических волн: штормовые микросейсм, гидротермальные очаги, транспорт и др., создающие поле интерференционных сейсмических волн. Все это приводит к тому, что не всегда возможно выполнить идентификацию и измерение фаз.

Для определения местоположения источников сейсмических волн также используется амплитудный метод пассивной локации. Так, в работе [Gelmor, 1954] находление координат источников микросейсм осуществлялось по отношению амплитуд трех простран-

ственно разнесенных станций. Для этого метода характерна большая погрешность в определении параметров координат. В работе [Tabulevich, 1977] положение источника возбуждения микросейсмических колебаний определяется сравнением амплитуд колебаний, записанных сейсмическими станциями, находящимися в разных точках земной поверхности. Выбор источника колебаний основан на принципе частотного синхронизма. Амплитудный метод применен в работе [Chernykh, Tabulevich, 2004] для определения местоположения виброисточников (без учета влияния помех).

Получение информации об объектах и явлениях, недоступных для непосредственного измерения, в частности в геофизике, приводит к необходимости косвенных измерений. Для обработки результатов косвенных измерений существенную роль играет априорная информация об исследуемых зависимостях. Во многих случаях функциональные связи носят обратно пропорциональную зависимость, что позволяет применить определенную методику обработки результатов и оценить погрешность таких косвенных измерений.

В данной работе, в дополнение к уже известным методам определения местоположения источника сей-

смических волн, предлагается использовать метод [Syten'ky, 1992] пассивной локации, основанный на закономерном затухании амплитуды сейсмических колебаний.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

В основе предлагаемого метода определения местоположения источника сейсмических волн (дальности и направления на него) лежит утверждение [Syten'ky, 2004]: если измеренное значение функции U связано обратно пропорциональной зависимостью с искомой величиной H , находящейся в степени $n \neq 0$ (n – любое), при постоянном значении числителя W , $U = W/H^n$, то H находится из выражения:

$$H = \Delta H \frac{U_2^{1/n}}{U_1^{1/n} - U_2^{1/n}}, \tag{1}$$

где ΔH – известное приращение H , U_1 – значение функции до введения ΔH , U_2 – значение функции после введения ΔH .

3. ДОКАЗАТЕЛЬСТВО

Для доказательства утверждения представим выражение $U_1 = W/H^n$ в виде $U_1 H^n = W$ с введением известного приращения ΔH , являющегося продолжением искомой величины H . При этом появляется новое значение функции, равное $U_2 = W/(H + \Delta H)^n$. Это выражение также преобразуем к виду $U_2 (H + \Delta H)^n = W$ и приравниванием левых частей, т.е. $U_1 H^n = U_2 (H + \Delta H)^n$, получаем тождество. Возведение левой и правой частей тождества в степень $1/n$, т.е. $U_1^{1/n} H = U_2^{1/n} (H + \Delta H)$, позволяет найти искомую величину $H = \Delta H \cdot U_2^{1/n} / (U_1^{1/n} - U_2^{1/n})$.

Известно, что амплитуды сейсмических колебаний связаны с мощностью W его источника и расстоянием R следующей функцией [Chernykh, Tabulevich, 2004]:

$$A = \frac{b\sqrt{W}}{R^N}, \tag{2}$$

где b – некоторая постоянная величина, зависящая от свойств среды, а N – эффективный коэффициент затухания сейсмических волн.

Расположение двух приемников на известном (базовом) расстоянии D друг от друга на прямой, соединяющей их с источником сейсмических волн (одномерный вариант), позволяет получить формулу для определения дальности источника сейсмических волн.

При этом первый сейсмоприемник измеряет амплитуду волн A_1 , а второй – A_2 :

$$A_1 = \sqrt{W} \frac{b_1}{R^N}, A_2 = \sqrt{W} \frac{b_2}{(R + D)^N}. \tag{3}$$

Полагая в (1) $H = R$, $\Delta H = D$, $U_1 = A_1$, $U_2 = A_2$, $n = N$ и учитывая в (3) b_1 и b_2 , получим выражение для вычисления дальности R от первого сейсмоприемного устройства до источника сейсмических волн:

$$R = D \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}}. \tag{4}$$

При измерении расстояния от источника сейсмических волн до сейсмоприемника базовое расстояние может не находиться на прямой линии, соединяющей первый приемник с источником сейсмических волн. В этом случае в качестве ΔH необходимо учитывать проекцию расстояния между приемниками на линию, соединяющую первый приемник с источником сейсмических волн. При этом $\Delta H = D \cos(\alpha)$, где α – угол между прямой, проходящей через сейсморазведочные станции, и направлением на источник сейсмических волн, измеряемый первым сейсмоприемником. Учитывая угол α , (4) запишем в виде:

$$R = D \cdot \cos \alpha \cdot \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}}. \tag{5}$$

Для определения направления на источник сейсмических волн воспользуемся, как и в [Syten'ky, 2011], радиально-базовым методом с взаимно-перпендикулярными базами (рис. 1), расположенными в одной плоскости (двумерное пространство), что позволит вычислить угол α .

Цифрами 1, 2 на рис. 1 обозначены первый и второй приемные пункты, расстояние между ними является базовым – $D1$. Цифрой 3 обозначен приемный пункт с базовым расстоянием между ним и 1-м пунктом – $D2$. Углами α и β обозначены направления на источник сейсмических волн (ИСВ), отсчитываемые от соответствующих линий 1–2 и 1–3.

На приемных пунктах измеряется амплитуда сейсмического сигнала. Дальность R до источника сейсмических волн определяется от пункта 1. Для этого можно воспользоваться как 1-м и 2-м сейсмоприемниками, так и 1-м и 3-м, т.е.

$$R = D1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}}$$

или

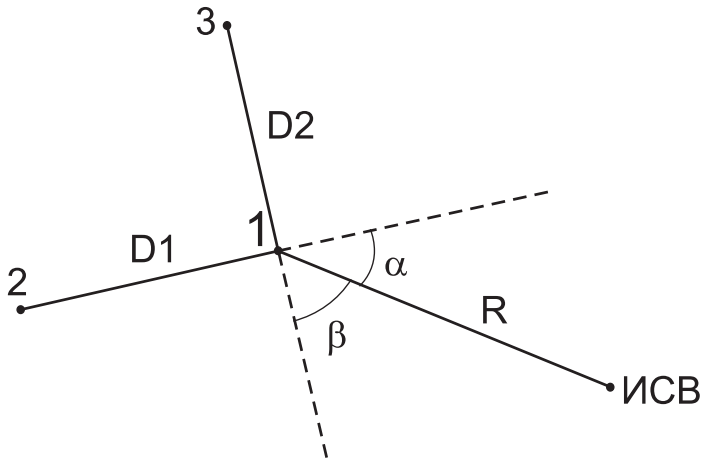


Рис. 1. Расположение приемных пунктов для определения направления на источник сейсмических волн (ИСВ). R – расстояние, отсчитываемое от 1-го приемного пункта до источника сейсмических волн; $D1, D2$ – базовые расстояния между приемными пунктами 1 и 2, 1 и 3; α, β – углы, отсчитываемые от 1-го приемного пункта, между направлением на источник сейсмических волн и базовыми расстояниями.

Fig. 1. Locations of stations for determination of directions to seismic wave sources (ИСВ). R – distance calculated from data received from the first station located nearest to ИСВ; $D1, D2$ – base distances between Stations 1 and 2 and Stations 1 and 3; α, β – angles (calculated from the first station) between direction to ИСВ and base distances.

$$R = D2 \cdot \cos \beta \cdot \frac{b_1^{1/N} A_3^{1/N}}{b_3^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_3^{1/N}}, \quad (6)$$

где $A_3^{1/N}$ – амплитуда сигнала, измеренная сейсмической приемным пунктом 3.

Для определения угла α будем считать:

$$\begin{aligned} D1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}} = \\ = D2 \cdot \cos \beta \cdot \frac{b_1^{1/N} A_3^{1/N}}{b_3^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_3^{1/N}}, \end{aligned}$$

но так как $\beta = (90^\circ - \alpha)$,

$$\begin{aligned} D1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}} = \\ = D2 \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \cdot \frac{b_1^{1/N} A_3^{1/N}}{b_3^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_3^{1/N}}. \end{aligned}$$

После несложных преобразований получаем:

$$\alpha = \arctg \frac{D1 \cdot \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}}}{D2 \cdot \frac{b_1^{1/N} A_3^{1/N}}{b_3^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_3^{1/N}}}. \quad (7)$$

Определенное в соответствии с (7) значение угла α позволяет определить направление на источник сейсмических волн, а также вычислить с помощью (5) его дальность.

Для пассивной локализации источников сейсмических волн в трехмерном пространстве воспользуемся рис. 2, на котором изображены совмещенные системы координат, декартова и сферическая.

Как следует из приведенного рис. 2, 1-й приемный пункт, расположенный в центре системы координат, является общим для всей пространственной системы и от него производится исчисление навигационных параметров источника сейсмических волн. От этого пункта на соответствующих базовых расстояниях $D1, D2, D3$ по координатам X, Y, Z находятся 2, 3 и 4-й сейсмоприемники. Сейсмические станции измеряют амплитуду колебаний источника сейсмических волн, значения которых позволят вычислить координаты эпицентра излучающего объекта.

Декартова система координат представляет собой взаимно-перпендикулярные оси X, Y и Z и плоскости XY, XZ, YZ . Сейсмические станции, расположенные на них, позволяют определить дальность источника сейсмических волн и направление на него в соответствующей плоскости. Но источники сейсмических волн, расположенные в пространстве, могут не находиться ни на одной из плоскостей декартовой системы координат. Поэтому на всех плоскостях определяются проекции дальности R , которые далее проецируются на оси координат, что необходимо для перехода в сферическую систему координат. Так, для плоскости XY выражение для определения проекции дальности R_{xy} источника сейсмических волн и направления на него α полностью совпадает с полученными ранее (5) и (7), а проекция R_x на ось координат X находится из прямоугольного треугольника, т.е.

$$\begin{aligned} R_{xy} = D1 \cdot \cos \alpha \cdot \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}}, \\ \alpha = \arctg \frac{D1 \cdot \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}}}{D2 \cdot \frac{b_1^{1/N} A_3^{1/N}}{b_3^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_3^{1/N}}}, \\ R_x = R_{xy} \cos \alpha. \quad (8) \end{aligned}$$

Аналогично получаем выражения для определения проекции дальности R_{xz} и направления на источник сейсмических волн μ в плоскости XZ и проекцию на ось Z :

$$R_{xz} = D3 \cdot \cos \mu \cdot \frac{b_1^{1/N} A_4^{1/N}}{b_4^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_4^{1/N}},$$

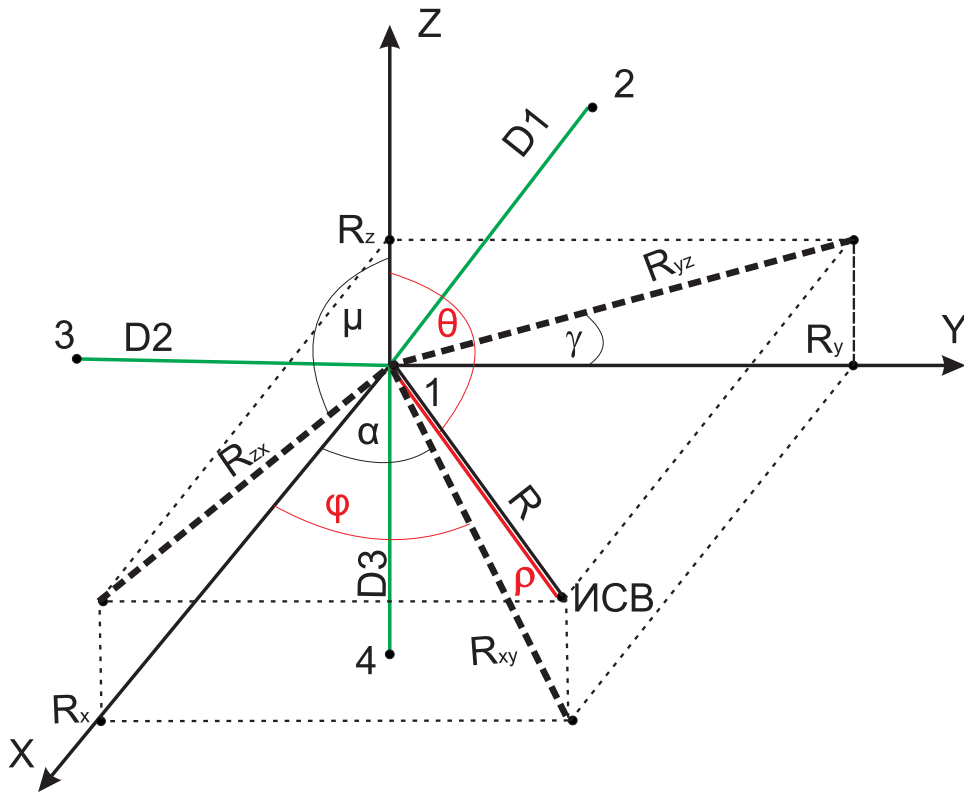


Рис. 2. Совмещенные системы координат: декартова с осями координат X, Y, Z и сферическая с ρ , θ и φ (дальность, полярный угол, азимутальный угол). R – дальность источника сейсмических волн (ИСВ) в декартовой системе, отсчитанная от начала координат, обозначенного цифрой 1; D1, D2, D3 – базовые расстояния между приемниками сейсмических волн, находящимися в точках 1, 2, 3, 4, расположенных на осях X, Y, Z; R_{xy} , R_{yz} , R_{zx} – проекции вектора дальности R на соответствующие плоскости; α , γ , μ – углы между проекциями вектора дальности R на оси координат X, Y, Z; R_x , R_y , R_z – проекции вектора дальности R на оси координат X, Y, Z.

Fig. 2. Combined coordination systems: the Descartes system (X, Y, Z axes) and the spherical system (ρ , θ and φ , i.e. distance, polar angle, and azimuth angle, respectively). R – distance to ИСВ in the Descartes system as calculated from the zero point marked by number 1; D1, D2, D3 – base distances between stations located at Points 1, 2, 3, and 4 (X, Y, Z axes); R_{xy} , R_{yz} , R_{zx} – projections of distance vector R to corresponding planes; α , γ , μ – angles between projections of distance vector R to X, Y, Z axes; R_x , R_y , R_z – projections of distance vector R to X, Y, Z axes.

$$\mu = \arctg \frac{D3 \cdot \frac{b_1^{1/N} A_4^{1/N}}{b_4^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_4^{1/N}}}{D1 \cdot \frac{b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N}}}, \quad (9)$$

$$R_z = R_{xz} \cos \mu.$$

В плоскости YZ выражения для проекции дальности R_{yz} , направления на источник сейсмических волн γ и проекции на ось Y будут иметь вид:

$$R_{yz} = D2 \cos \gamma \frac{b_1^{1/N} A_3^{1/N}}{b_3^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_3^{1/N}},$$

$$\gamma = \arctg \frac{D2 \cdot \frac{b_1^{1/N} A_3^{1/N}}{b_3^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_3^{1/N}}}{D3 \cdot \frac{b_1^{1/N} A_4^{1/N}}{b_4^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_4^{1/N}}},$$

$$R_y = R_{yz} \cos \gamma. \quad (10)$$

Для сферической системы координат, считая, что она согласована с декартовой системой, воспользуемся формулами перехода [Bronshstein, Semendyaev, 1986], в соответствии с которыми дальность (полярный радиус) ρ до источника сейсмических волн, азимутальный угол φ и полярный угол θ определяются выражениями:

$$\rho = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2},$$

$$\varphi = \arctg \frac{R_y}{R_x},$$

$$\theta = \arctg \frac{\sqrt{R_x^2 + R_y^2}}{R_z}, \quad (11)$$

где R_x, R_y, R_z – проекции вектора R на оси декартовой системы координат.

Значения величин R_x, R_y, R_z определяются с помощью выражений (8), (9), (10). Конечный результат вычисляется по формулам (11).

4. АНАЛИЗ МЕТОДА ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ

Расчет абсолютной погрешности, возникающей при косвенных измерениях, является частным случаем определения статистических характеристик функции H от случайных величин U_1 и U_2 (1) и осуществляется согласно работе [Mirsky, 1975], в которой выражение для определения среднеквадратического отклонения величины H имеет вид:

$$\sigma_H = \sqrt{\left[\frac{\partial H}{\partial U_1} \right]^2 \cdot \sigma_{U_1}^2 + \left[\frac{\partial H}{\partial U_2} \right]^2 \cdot \sigma_{U_2}^2}, \quad (12)$$

где $H = \Delta H \cdot \frac{U_2^n}{U_1^n - U_2^n}$ – анализируемая величина; σ_{U_1} и σ_{U_2} – среднеквадратические отклонения измеряемых величин U_1 и U_2 . Подставляя H в (12) и произведя соответствующие преобразования, получим окончательный результат:

$$\sigma_H = \frac{\Delta H \cdot U_1^n \cdot U_2^n}{n \cdot (U_1^n - U_2^n)^2} \sqrt{\frac{\sigma_{U_1}^2}{U_1^{2n}} + \frac{\sigma_{U_2}^2}{U_2^{2n}}}. \quad (13)$$

В процессе измерения амплитуд колебаний источника сейсмических волн сейсмоприемниками (совместно с усилительной аппаратурой) вносятся погрешности измерения A_1 и A_2 , которые характеризуются среднеквадратическими значениями σ_{A_1} и σ_{A_2} . При этом погрешность измерения дальности R определяется среднеквадратическим отклонением σ_R и вычисляется с помощью (13):

$$\sigma_R = D \frac{b_2^{1/N} A_1^{1/N} b_1^{1/N} A_2^{1/N}}{N(b_2^{1/N} A_1^{1/N} - b_1^{1/N} A_2^{1/N})^2} \sqrt{\frac{1}{g_1^2} + \frac{1}{g_2^2}}, \quad (14)$$

где $g_1 = \frac{A_1}{\sigma_{A_1}}$, $g_2 = \frac{A_2}{\sigma_{A_2}}$ – отношения сигнал/помеха.

Предполагаем, что вместе с сигналом (амплитуда колебаний источника сейсмических волн) присутствует длительная помеха в виде фоновых микросейсмических колебаний и других мешающих сейсмических волн. Так как погрешности, вносимые измерителем, не

зависят от внешних помех, оценку среднеквадратических отклонений измеряемой амплитуды колебаний источника сейсмических волн в присутствии помех представим в виде $\sigma_{\tilde{A}} = \sqrt{\sigma_A^2 + \sigma_n^2}$ [Mirsky, 1975], где σ_A – среднеквадратическое отклонение, вносимое измерителем амплитуды без помех; σ_n – среднеквадратическое значение помехи.

Для учета погрешности измерения и действия внешних помех в (14) вводятся оценки амплитуды колебаний источника сейсмических волн. Среднеквадратическое отклонение вычисляется по формуле (14):

$$\sigma_R = D \frac{b_2^{1/N} \tilde{A}_1^{1/N} \cdot b_1^{1/N} \tilde{A}_2^{1/N}}{N(b_2^{1/N} \tilde{A}_1^{1/N} - b_1^{1/N} \tilde{A}_2^{1/N})^2} \sqrt{\frac{1}{\tilde{q}_1^2} + \frac{1}{\tilde{q}_2^2}}, \quad (14')$$

где \tilde{A}_1, \tilde{A}_2 – оценки амплитуды колебаний, полученные на выходе соответствующих сейсмоприемников, при наличии помех; $\tilde{q}_1 = \frac{\tilde{A}_1}{\sigma_{\tilde{A}_1}}$, $\tilde{q}_2 = \frac{\tilde{A}_2}{\sigma_{\tilde{A}_2}}$ – отношения сигнал/помеха.

Выражение для абсолютной погрешности определения угла α находится по вышеизложенной методике, применяемой при косвенных измерениях, и имеет вид:

$$\sigma_\alpha = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1^2 + C_2^2} \sqrt{\frac{1}{g_{C_1}^2} + \frac{1}{g_{C_2}^2}}, \quad (15)$$

где $g_{C_1} = \frac{C_1}{\sigma_{C_1}}$, $g_{C_2} = \frac{C_2}{\sigma_{C_2}}$ – величины, обратные относительным погрешностям измерения дальности R , $C_1 = D1 \cdot \frac{b_1^{1/N} \tilde{A}_2^{1/N}}{b_2^{1/N} \tilde{A}_1^{1/N} - b_1^{1/N} \tilde{A}_2^{1/N}}$, $C_2 = D2 \cdot \frac{b_1^{1/N} \tilde{A}_3^{1/N}}{b_3^{1/N} \tilde{A}_1^{1/N} - b_1^{1/N} \tilde{A}_3^{1/N}}$; $\sigma_{C_1}, \sigma_{C_2}$ – абсолютные погрешности вычисления C_1 и C_2 .

Результирующая среднеквадратическая погрешность σ_ρ вычисления дальности с учетом (14') и (15) определяется выражением [Belyaevsky et al., 1982]:

$$\sigma_\rho = \sqrt{\sigma_R^2 + R^2 \sigma_\alpha^2}. \quad (16)$$

Полученные выше результаты позволяют вычислить абсолютные погрешности определения координат источника излучения в трехмерном пространстве, которые определяются среднеквадратическими значениями дальности:

$$\sigma_\rho = \frac{1}{\rho} \sqrt{R_x^2 \sigma_{R_{xy}}^2 + R_y^2 \sigma_{R_{yz}}^2 + R_z^2 \sigma_{R_{xz}}^2},$$

где $\sigma_{R_{xy}}, \sigma_{R_{yz}}, \sigma_{R_{xz}}$ – среднеквадратические значения

оценок проекций R_{xy}, R_{yz}, R_{xz} на плоскости XY, YZ, XZ соответственно, определяемые как (16) с учетом (8), (9), (10), (14') и (15); азимутального угла:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{1}{R_x^2 + R_y^2} \sqrt{R_y^2 \sigma_{R_{xy}}^2 + R_x^2 \sigma_{R_{yz}}^2},$$

полярного угла:

$$\sigma_{\Theta} = \frac{1}{\rho^2} \sqrt{R_x^2 \sigma_{R_{xy}}^2 + R_y^2 \sigma_{R_{yz}}^2 + \left[\frac{R_x^2 + R_y^2}{\sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2}} \right]^2 \sigma_{R_{xz}}^2}.$$

Как следует из выражения (11), дальность расположения источника сейсмических волн, а также его азимутальный и полярный углы зависят от эффективного коэффициента затухания сейсмических волн N и постоянных величин b_1, b_2, b_3 и b_4 , характеризующих свойства среды распространения сейсмических волн.

Радиально-базовый метод позволяет определить коэффициент затухания сейсмических волн N при известном расстоянии R до источника сейсмических волн и направлении на него, известных коэффициентах b_1, b_2, b_3 и b_4 и известном базовом расстоянии D . Для этого необходимо воспользоваться выражением (5), из которого после несложных преобразований для одномерного и двумерного пространств вычисляется коэффициент затухания по формуле:

$$N = \frac{\lg(b_2) - \lg(b_1) + \lg(A_1) - \lg(A_2)}{\lg(R + D \cos \alpha) - \lg(R)}.$$

Мощность источника сейсмических волн может быть вычислена с помощью выражения (4), т.е.

$$W = \sqrt{\frac{A_1 R^N}{b_1}} \text{ или } W = \sqrt{\frac{A_2 (R + D \cos \alpha)^N}{b_2}}.$$

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность применения радиально-базового метода пассивной локализации в решении задачи определения местоположения источника сейсмических волн. Полученные аналитические выражения для дальности источника сейсмических волн и направления на него в одномерном, двумерном и трехмерном пространствах позволят определить его координаты в соответствующем пространстве при измерении закономерного затухания амплитуд сейсмических волн в среде сейсмическими приемниками, расположенными на известном базовом расстоянии друг от друга. Расчет абсолютных погрешностей, возникающих при определении координат источника сейсмических волн радиально-базовым методом, возможен по полученным в работе аналитическим выражениям для расчета среднеквадратических отклонений измеряемых амплитуд и параметров координат для случая косвенных измерений при наличии сигнала и помехи, представляющей собой шум измерительной аппаратуры и сейсмические помехи, а также влияние среды распространения сейсмических волн. Радиально-базовый метод также позволяет определить коэффициент затухания сейсмических волн N при известном расстоянии R до источника сейсмических волн и направлении на него, известных коэффициентах b_1, b_2, b_3 и b_4 и известном базовом расстоянии D . Известное расстояние и коэффициент затухания дают возможность расчета мощности источника сейсмических волн.

6. ЛИТЕРАТУРА

- Belyaevsky L.S., Novikov V.S., Olyanyuk P.V., 1982. Fundamentals of radio navigation (textbook for civil aviation universities). «Transport» Publishing house, Moscow, 288 p. (in Russian) [Беляевский Л.С., Новиков В.С., Олянюк П.В. Основы радионавигации. Учебник для вузов гражданской авиации. М.: «Транспорт», 1982. 288 с.].
- Bronshtein I.N., Semendyaev K.A., 1986. Guidebook of mathematics for engineers and students of technical colleges. Edition 13, revised. Nauka, Moscow, 544 p. (in Russian) [Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся вузов. 13-е издание, исправленное. М.: Наука, 1986. 544 с.].
- Chernykh E.N., Tabulevich V.N., 2004. Determination of location of vibration sources by the amplitude method. In: E.I. Gordeev (Ed.), Linkages among tectonics, seismicity, magma genesis, and eruption in volcanic arcs: IV International Biennial Workshop on subduction processes emphasizing the Japan-Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs, Petropavlovsk-Kamchatsky, August 21–27, 2004. Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, p. 263–264.
- Gel'mor M.H., 1954. Amplitude distortion distribution of storm microseisms. In: Symposium on microseisms. National Research Council Publication 306. Washington, D.C.
- Mirsky G.Ya., 1975. Radio electronic measurements. Energiya, Moscow, 265 p. (in Russian) [Мирский Г.Я. Радиоэлектронные измерения. М.: Энергия, 1975. 265 с.].
- Syten'ky V.D., 1992. Radial basic method for determining the range of the radiation source. In: Thesis of the Regional Scientific and Engineering Conference A.S. Popov NTORES, Rostov-on-Don, 26.01–30.01.1992. The Rostov Regional Management Board of Academician Vavilov Technical Society for Instrumentation, Rostov-on-Don, p. 45 (in Russian) [Сы-

Сытенский В.Д. Радиально-базовый метод определения дальности источника излучения // Тезисы докладов областной научно-технической конференции НТОРЭС им. А.С. Попова, Ростов на Дону, 26.01–30.01. 1992. Ростов-на-Дону: Ростовское областное правление НТО приборостроения им. Академика Вавилова, 1992. С. 45].

Syten'ky V.D., 2004. Errors in indirect measurements of related inversely dependent quantities. In: Information approach to natural, human and technical sciences: Proceedings of the International Conference. Part 3. TRTU, Taganrog, p. 75–80 (in Russian) [Сытенский В.Д. Погрешности при косвенных измерениях величин, связанных обратно пропорциональной зависимостью // Информационный подход в естественных, гуманитарных и технических науках: Материалы международной научной конференции. Ч. 3. Таганрог: ТРТУ, 2004. С. 75–80].

Syten'ky V.D., 2011. Passive location based on amplitude measurements. *Izvestiya VUZov Rossii. Radioelektronika* 1, 69–76 (in Russian) [Сытенский В.Д. Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2011. № 1. С. 69–76].

Tabulevich V.N., 1977. On determination of the excitation source of microseismic oscillation. *Izvestiya AN SSSR. Fizika Zemli* 5, 89–92 (in Russian) [Табулевич В.Н. Об определении положения источника возбуждения микросейсмических колебаний // Известия АН СССР, сер. Физика Земли. 1977. № 5. С. 89–92].



Сытенский Василий Дмитриевич, канд. техн. наук
Технологический институт Южного Федерального университета
347928, Таганрог, пер. Некрасовский, 44, Россия
✉ e-mail: sytenky@rambler.ru

Syten'ky, Vasily D., Candidate of Technical Sciences
Taganrog Institute of Technology, Southern Federal University
44 Nekrasovsky lane, Taganrog 347928, Russia
✉ e-mail: sytenky@rambler.ru