

ЛОКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОЙ ГРУППЫ

В.А. Харламов, Д.Н. Локтев, Ю.С. Рыбнов

Большой опыт проведения геофизического мониторинга различных территорий показывает, что сейсмологические наблюдения необходимо дополнять наблюдениями за акустическими возмущениями. Использование микробарометров в составе сейсмической группы при геофизическом мониторинге в Нижегородской области в 2012 году показало, что возможно не только выделить низкоскоростные сейсмические сигналы (сигналы со скоростью распространения близкой к скорости звука), которые вызваны акустическими возмущениями, но и провести локацию этих сигналов в пространстве.

Введение

При проведении геофизического мониторинга территорий часто возникает вопрос достоверности интерпретации регистрируемых сигналов. В частности, при проведении сейсмологического мониторинга площадок АЭС [Кишкина, Локтев и др., 2012] регистрируется большое количество сейсмических сигналов, скорость распространения которых от 300 до 900 м/с. Локальные сигналы с такими скоростями могут быть связаны с процессами, протекающими в верхнем низкоскоростном слое. Одним из источников таких сигналов может быть процесс карстообразования.

Для определения природы сейсмических сигналов системы сейсмического мониторинга дополняются регистраторами других геофизических полей: электрического и акустического. Одновременное измерение акустических и сейсмических колебаний позволяет с большой долей достоверности определить случаи, когда зарегистрированный сейсмический сигнал является следствием воздействия акустических возмущений непосредственно на сейсмический датчик.

Установка нескольких пунктов сейсмоакустической регистрации, разнесенных в пространстве, позволяет на этапе выделения сигналов распознать акустические события по кажущейся скорости распространения волны ~350 м/с. Однако, если источник сигнала находится непосредственно над сейсмической группой, например, – во время грозы, то времена прихода волны на всех точках регистрируются одновременно. Высокая кажущаяся скорость, так называемая «скорость следа», очень близка к кажущейся скорости волн, имеющих сейсмическую природу. Со временем группы волн начинают расходиться во времени, но это не всегда можно увидеть на фоне достаточно высокого уровня микросейсмического шума. Использование сейсмоакустической группы позволяет не только поднять качество распознавания природы выделяемых сейсмических сигналов, но и провести локацию сейсмических и акустических событий.

Контроль за электрическим полем как в приповерхностной атмосфере, так и в грунте позволяет определить прохождение атмосферных возмущений, в частности, грозových фронтов, которые являются одним из источников акустических ко-

лебаний. Грозовые разряды на расстоянии до 5–10 км уверенно фиксируются измерителем электрического потенциала в грунте в виде высокочастотных импульсов, что при точной синхронизации регистратора по времени GPS позволяет определить время зарождения акустического сигнала.

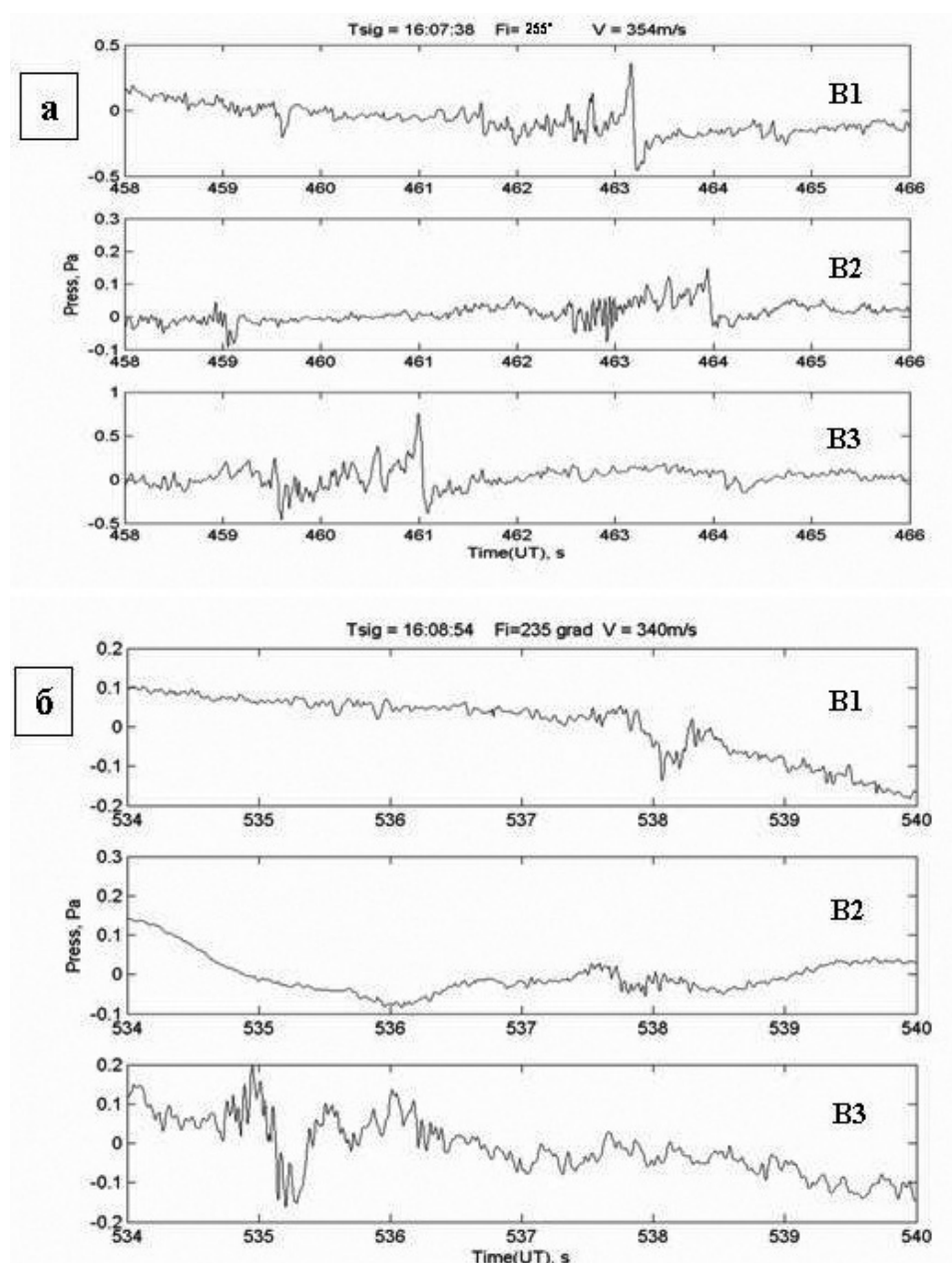


Рис. 1. Примеры зарегистрированных сигналов тремя акустическими датчиками (B1, B2, B3). Сигналы зарегистрированы во время прохождения грозового фронта 22 августа 2012 г.
а – время 16:07:38 (UT); б – время 16:08:54 (UT)

В данной работе основное внимание уделено исследованию акустических сигналов, зарегистрированных во время проведения геофизического мониторинга в Нижегородской области в 2012 г. Как показывает опыт наблюдений, около 80% зарегистрированных локальных сейсмических сигналов имеет акустическую природу.

Система геофизического мониторинга представляла собой группу из трех точек, расположенных на расстоянии около 1 км друг от друга. Точки оборудованы трехкомпонентными широкополосными сейсмометрами и микробарографами. Дополнительно на одном из пунктов наблюдений регистрировалась напряженность электрического поля в грунте и в приповерхностной атмосфере.

Пример зарегистрированных акустических сигналов во время прохождения грозового фронта представлен на рис. 1. Для определения местоположения источников акустических сигналов была предложена следующая методика.

Методика

Система регистрации, состоящая из разнесенных в пространстве акустических (инфразвуковых) датчиков, позволяет оценить три пространственные координаты источника сигналов как точку пересечения трех гиперboloидов вращения вокруг соответствующих баз [Харламов, 2003]. Оценивались три пространственные координаты источника сигналов. В случае расположения датчиков на горизонтальной плоскости (поверхности земли) [Farges, Blanc, 2010], для определения высоты источника, использовались расчетные трассы распространения сигнала при различных значениях угла места источника сигнала и времени распространения сигнала от источника.

При расположении приемников на горизонтальной плоскости (поверхности земли) система позволяет вычислить лишь пространственную линию положения источника. Так, для каждой пары датчиков, образующих соответствующую

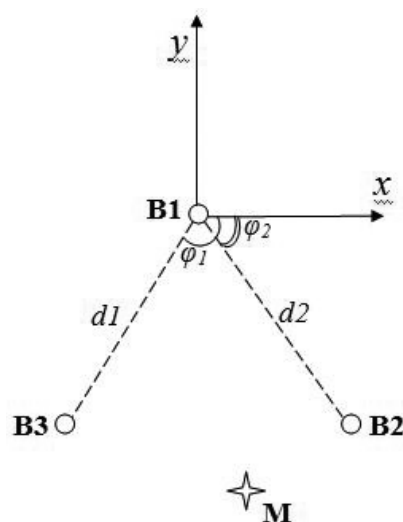


Рис. 2. Схема расположения 3-х пунктов регистрации на плоскости

базу, при конкретной разности расстояний до этих датчиков, геометрическим местом источника будет гиперboloид вращения вокруг линии базы. Линия пересечения двух гиперboloидов, соответствующих двум базам, и будет возможным местом положения источника сигнала в пространстве. Для нахождения точки на ней, определяющей координаты источника, необходима дополнительная информация. Например, если каким-либо способом оценить угол ϵ , между горизонтальной поверхностью и вектором на источнике сигнала, то можно построить из начала координат конус с углом ϵ . Точка пересечения его с линией пересечения гиперboloидов даст место источника сигнала.

Рассмотрим систему регистрации, состоящую из 3-х приемников B1, B2, B3, образующих две измерительные базы $d1 = 1080$ м, $d2 = 1080$ м (рис. 2). Выберем систему коор-

динат с центром, совмещенным с точкой одного из приемников, например, $B1$. Ось z вертикальна, а оси x и y направлены на восток и север, соответственно, так как показано на рис. 2. Разности расстояний от точки источника M до соответствующей пары приемников $B1-B2$ и $B1-B3$ определяют два гиперboloида вращения вокруг соответствующей базы. При этом базы $d1$, $d2$, являющиеся осями вращения гиперboloидов, повернуты относительно оси x на соответствующие углы: $\varphi_1 = 120^\circ$ и $\varphi_2 = 60^\circ$.

Уравнения гиперboloидов по базам $d1$, $d2$ в соответствующей повернутой системе координат $0'x'y'z'$ имеют канонический вид

$$\frac{(x' - x'_{0i})^2}{a_i^2} - \frac{y'^2}{b_i^2} - \frac{z'^2}{b_i^2} = 1, \quad (1)$$

где $a_i = \Delta r_i/2$; Δr_i – разность расстояний от точки M источника до образующих соответствующую базу пары точек $B1-B2$ и $B1-B3$, $b_i^2 = d_i^2/4 - a_i^2$; d_i – длина базы; $(x'_{0i}, 0, 0)$ – координаты центра базы d_i ; $i = 1, 2$.

Чтобы записать уравнения гиперboloидов в исходной системе координат $0xyz$, необходимо выполнить преобразование координат при повороте координат, которое задается системой уравнений

$$\begin{aligned} x' &= \cos(\varphi)x - \sin(\varphi)y \\ y' &= \sin(\varphi)x + \cos(\varphi)y \\ z' &= z \end{aligned} \quad (2)$$

Подставив (2) в (1) и выполнив преобразования, получим уравнение гиперboloида по соответствующей базе ($d1$, $d2$) в исходной системе координат $0xyz$

$$A_x x^2 + A_y y^2 + A_z z^2 + 2A_{xy}xy - 2B_x x - 2B_y y + C = 0, \quad (3)$$

где введены следующие обозначения

$$\begin{aligned} A_x &= \frac{t_{11}^2}{a^2} - \frac{t_{12}^2}{b^2}; A_y = \frac{t_{21}^2}{a^2} - \frac{t_{22}^2}{b^2}; A_z = -\frac{t_{33}^2}{b^2}; A_{xy} = \frac{t_{11}t_{21}}{a^2} - \frac{t_{12}t_{22}}{b^2}; \\ B_x &= \frac{t_{11}^2 x_0 + t_{11}t_{21}y_0}{a^2}; B_y = \frac{t_{21}^2 y_0 + t_{11}t_{21}x_0}{a^2}; \\ C &= \frac{t_{11}^2 x_0^2 + t_{21}^2 y_0^2 + 2t_{11}t_{21}x_0 y_0}{a^2} - 1; \end{aligned}$$

Здесь $t_{11} = \cos(\varphi)$, $t_{12} = \sin(\varphi)$, $t_{21} = -\sin(\varphi)$, $t_{22} = \cos(\varphi)$, $t_{33} = 1$, $x_0 = t_{11}x'_0$, $y_0 = t_{21}x'_0$ координаты центра базы в координатной системе $0xyz$. Для проведения расчетов уравнение (3) удобнее решить относительно z

$$z(x, y) = -p(x, y) \pm \sqrt{p^2(x, y) - q(x, y)}, \quad (4)$$

$$\text{где } p(x, y) = \frac{A_{xz}x + A_{yz}y - B_z}{A_z}, \quad q(x, y) = \frac{A_x x^2 + A_y y^2 + 2A_{xy}xy - 2B_x x - 2B_y y + C}{A_z}.$$

Выражение (4) позволяет вычислить поверхность положения (гиперboloид) по i -той базе, повернутой на угол φ_i в плоскости $x0y$, при известной разности хода Δr_i (измерена разность времен прихода – РВП Δt_i) для этой базы. Совместное решение пары уравнений вида (4) определяет линию пересечения гиперboloидов. При ре-

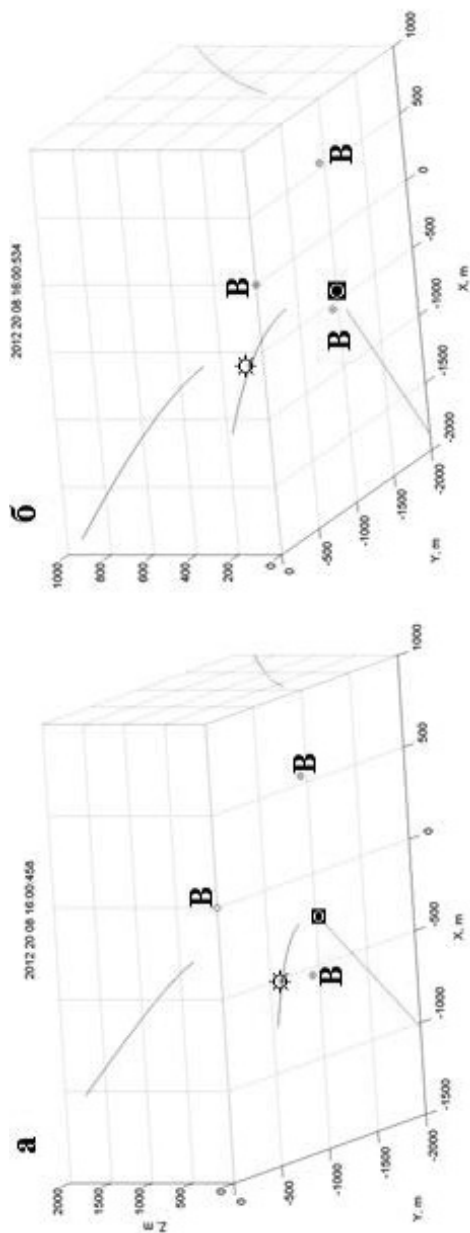


Рис. 3. Линия положения источника сигнала в пространстве и ее проекции на координатные плоскости

а: ☼ – точка источника сигнала с координатами $X = -700$ м, $Y = -1600$ м, $Z = 1180$ м (пространственное решение) и $\blacksquare$ – точка источника сигнала $X = -242$ м $Y = -1031$ м при решении на плоскости; **б:** ☼ – точка источника сигнала с координатами $X = -1200$ м, $Y = -1500$ м, $Z = 600$ м (пространственное решение) и $\blacksquare$ – точка источника сигнала $X = -434$ м $Y = -978$ м при решении на плоскости

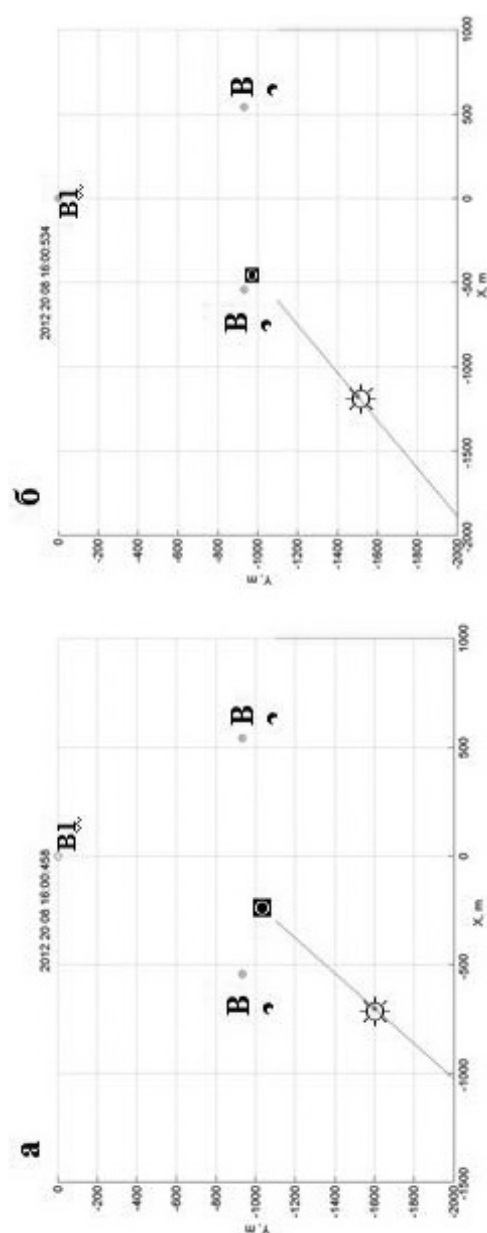


Рис. 4. Проекция линии положения источника сигнала на горизонтальную плоскость xOy .

а: ☼ – точка источника сигнала с координатами $X = -700$ м, $Y = -1600$ м $\varphi = 203^\circ$; $\blacksquare$ – точка источника сигнала $X = -242$ м $Y = -1031$ м $\varphi = 193^\circ$ (при решении на плоскости); **б:** ☼ – точка источника сигнала с координатами $X = -1200$ м, $Y = -1500$ м $\varphi = 218^\circ$; $\blacksquare$ – точка источника сигнала $X = -434$ м $Y = -978$ м $\varphi = 203^\circ$ (при решении на плоскости)

шении уравнения, получающегося приравниванием двух выражений вида (4), находится его корень по одной переменной (x), когда другая (y) фиксируется. Задав диапазон значений y , находится проекция на плоскость xOy линии пересечения гиперboloидов

$$x_{12} = f_{12}(y) \quad (5)$$

Подставляя (5) в одно из уравнений (4), определяется проекция линии пересечения $z_{12}(y)$ на плоскость zOy . В результате получается уравнение пространственной линии пересечения гиперboloидов в проекциях, которую в дальнейшем будем называть линией положения источника сигнала.

Результаты наблюдений

Рассмотрим несколько случаев регистрации акустических сигналов в 3-х пунктах. На рис. 1 показаны зарегистрированные тремя датчиками сигналы и вычисленные методом PMCC (Progressive Multichannel Cross-Correlation method) [Cansi, 1995, Рыбнов, Харламов, 2005] азимут на источник $\varphi = 235^\circ$ и скорость следа $V = 340$ м/с, для сигнала рис. 1,б и $\varphi = 255^\circ$ и скорость следа $V = 354$ м/с для сигнала рис. 1,а. По соотношению скоростей V и реальной скорости звука $c = 330$ м/с оценивается угол ε источника сигнала

$$\varepsilon = \arccos(c/V)$$

По разности времен вступлений сигнала (рис. 1,а б) и реальной скорости звука c , вычисляются разности расстояний до каждой пары пунктов и строятся гиперboloиды и их пространственные линии пересечения, которые изображены на рис. 3. Отмечены точки источников сигналов, которые получены как точки пересечения линий положения с построенным из начала координат конусом с углом ε . На рис. 4 показаны проекции линий пересечения на плоскость xOy . Проекции точек источника сигнала на плоскость xOy определяют пеленг для пространственной и плоской задачи. Точка пересечения гипербол на плоскости при решении плоской задачи (-242 м, -1031 м) совпадает с точкой пересечения линии положения источника с плоскостью xOy , как показано на рис. 3,а.

На рис. 5 показаны проекции линий пересечения на плоскость в сечении по горизонтальной проекции линии пересечения гиперboloидов rOz . Видны точки пе-

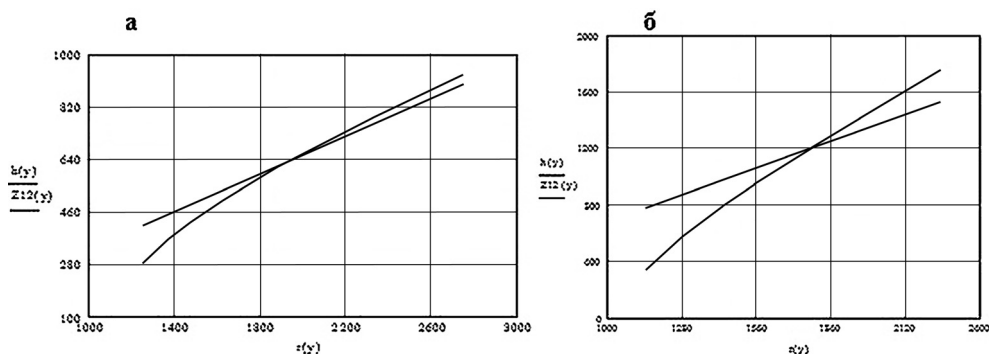


Рис. 5. Проекция линии положения источника сигнала и конуса с углом ε на плоскость rOz
а: $\varepsilon = 18^\circ$ точка пересечения дает координаты источника сигнала $r = 1900$ м, $h = 620$ м и $\varphi = 18^\circ$;
б: $\varepsilon = 32^\circ$ точка пересечения дает координаты источника сигнала $r = 1750$ м, $h = 1184$ м и $\varphi = 32^\circ$

ресечения линий положения с проекцией конуса на эту плоскость, которые определяют дальность r и высоту h источника.

Выводы

Проведенные исследования показывают, что использование регистрации акустических колебаний необходимо при сейсмологических наблюдениях для корректной интерпретации сейсмических сигналов. Использование микробарометров совместно с сейсмометрами в группе позволяет не только определить природу сейсмических сигналов, но провести локацию их в пространстве.

Предложенная методика локации имеет преимущество в сравнении с широко применяемым методом локации РМСС, так как точнее определяет направление на источник и дополнительно позволяет определить высоту источника атмосферного возмущения в ближней зоне (на расстояниях, соизмеримых с размером базы регистраторов).

Использование регистрации электрического поля позволяет определить время прохождения атмосферных фронтов в районе регистрации, а также определить время электрического разряда при локации грозových разрядов, которое можно сопоставить со временем регистрации акустических сигналов.

Работа выполнена при поддержке гранта НШ-231.2012.5 по поддержке ведущих научных школ РФ.

Литература

Кишкина С.Б., Д.Н. Локтев, И.А. Санина и др. Сейсмологический мониторинг проектируемой площадки нижегородской АЭС с использованием малоапертурной группы // Динамические процессы в геосферах Вып. 3: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2012, с. 57–65.

Харламов В.А. Измерение координат источников инфразвука в трехмерном пространстве // Геофизические процессы в нижних и верхних оболочках Земли. Книга 2: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: 2003. С. 386–396.

Рыбнов Ю.С., Харламов В.А., Евменов В.Ф. Инфразвуковая система регистрации акустико-гравитационных волн // Динамические процессы в системе внутренних и внешних взаимодействующих геосфер: сб. научн. тр. ИДГ РАН. М.: ГЕОС, 2005, с. 29–33.

Canci Y.(1995). An automatic seismic event processing for detection and location: The РМСС method // Geophys. Res. Lett., 22, p. 1021–1024, doi:10.1029/95GL00468.

Thomas Farget and Elisabeth Blanc. Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas // Jormal Geophys. Res. Vol 115, A00E31, 01-17, doi:10.1029/2009JA014700, 2010.