

ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-144-156>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 534.23:681.884



Локализация источников акустического излучения по данным распределенной системы комбинированных приемников

А. О. Щербина*, А. А. Солодчук

Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
684034, Камчатский край, с. Паратунка, ул. Мирная, 7, Россия

Аннотация. Акустико-эмиссионный метод является одним из эффективных методов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния пород. При этом источником сигнала служат сами исследуемые породы. Сигналы геоакустического излучения представляют собой комбинацию импульсов различной амплитуды, длительности (порядка 30-100 мс) и частоты заполнения (до 10 кГц), с крутым фронтом и плавным спадом. Частота следования импульсов варьируется от единиц в минуту до нескольких сотен в секунду в зависимости от напряженно-деформированного состояния пород. В статье представлены результаты эксперимента по определению расстояния до источников высокочастотного акустического излучения, генерируемого в приповерхностных осадочных породах. Регистрация таких сигналов осуществлялась с помощью установленной в естественном водоёме распределенной системы, состоящей из двух комбинированных приемников и одного всенаправленного приемника звукового давления. Использование комбинированных приемников дает возможность восстановить пространственно-временное распределение вектора колебательной скорости частиц среды в волне, используя векторно-фазовые методы, и определить направление на источник сигнала. Локализация источников излучения осуществлялась двумя способами: триангуляцией и по разнице времени прихода сигналов с разнесенных приемников. Измерены координаты более чем 40 источников акустического излучения, построено их пространственное распределение. Погрешность измерений составила менее 0.5 м. В работе представлены направления для дальнейшего развития исследования для повышения точности локализации источников излучения. Настоящая статья является расширенной и переработанной версией одноименного доклада, представленного авторами на XIII международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений» (25 – 29 сентября 2023, с. Паратунка, Камчатский край.).

Ключевые слова: геоакустическое излучение, высокочастотная геоакустическая эмиссия, локализация источника звука, векторно-фазовые методы.

Получение: 15.10.2023; Исправление: 22.10.2023; Принятие: 31.10.2023; Публикация онлайн: 02.11.2023

Для цитирования. Щербина А. О., Солодчук А. А. Локализация источников акустического излучения по данным распределенной системы комбинированных приемников // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2023. Т. 44. № 3. С. 144-156. EDN: XNEHRM. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-144-156>.

Финансирование. Работа выполнена в рамках Государственного задания по теме (2021–2023 гг.) «Физические процессы в системе ближнего космоса и геосфер при солнечных и литосферных воздействиях», регистрационный номер АААА-А21-121011290003-0.

Конкурирующие интересы. Конфликтов интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция:  E-mail: albert_pkam@mail.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License



© Щербина А. О., Солодчук А. А., 2023

© ИКИР ДВО РАН, 2023 (оригинал-макет, дизайн, составление)

PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-144-156>

Research Article

Full text in Russian

MSC 76Q05



Localization of Acoustic Emission Sources According to the Data of a Distributed System of Combined Receivers

A. O. Shcherbina, A. A. Solodchuk*

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, FEB RAS,
684034, Kamchatka region, Paratunka, Mirnaya str., 7, Russia

Abstract. The article relates to the field of non-destructive testing of the stress-strain state of rocks in seismically active regions using the acoustic-emission method. The studied rocks are the source of the signal. Long-term studies in Kamchatka show that geoacoustic emission signals are a combination of pulses of various amplitudes, duration (about 30-100 ms) and fill frequency (up to 10 kHz), with a steep front and a smooth decline. The pulse repetition rate varies from units per minute to several hundred per second, depending on the stress-strain state of the rocks. The article presents the results of an experiment to determine the distance to sources of high-frequency acoustic radiation generated in near-surface sedimentary rocks. An underwater distributed acoustic system installed in Mikizha lake in Kamchatka is used to record signals. Two combined receivers are used as sensors, recording sound pressure and three of its gradients, and one sound pressure receiver. The direction to the source of the geoacoustic signal recorded by each receiver is determined by vector-phase methods. After that, radiation sources are localized in two ways: by triangulation and by the difference in the arrival time of signals from spaced receivers (empirical implementation of the difference-range-measuring method). The features of the application of the methods are described, taking into account the design features of the registration system. During the experiment, the coordinates of more than 40 sources of geoacoustic emission were measured, and their spatial distribution was plotted. The measurement error was less than 0.5 m. The paper presents directions for further development of research to improve the accuracy of emission sources localization. This article is an expanded and revised version of the report of the same name, presented by the authors at the XIII international conference "Solar-terrestrial relations and physics of earthquake precursors" (September 25 – 29, 2023, Paratunka, Kamchatka).

Key words: high-frequency geoacoustic emission, sound source localization, vector-phase methods.

Received: 15.10.2023; Revised: 22.10.2023; Accepted: 31.10.2023; First online: 02.11.2023

For citation. Shcherbina A. O., Solodchuk A. A. Localization of acoustic emission sources according to the data of a distributed system of combined receivers. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2023, 44: 3, 144-156. EDN: XNEHRM. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2023-44-3-144-156>.

Funding. The work was carried out within the framework of the State task on the topic (2021–2023) "Physical processes in the system of near space and geospheres under solar and lithospheric impact registration number AAAA-A21-121011290003-0.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: albert_pkam@mail.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Shcherbina A. O., Solodchuk A. A., 2023

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2023 (original layout, design, compilation)



Введение

Камчатка относится к наиболее геодинамически активным районам мира. Высокая активность опасных природных явлений (землетрясений, цунами, извержений вулканов) определяет значительный уровень природной опасности как для населения, так и для технических и жилых сооружений. Этим определяется важность исследования напряженно-деформированного состояния пород и происходящих в них геомеханических процессов [1].

Одним из эффективных методов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния пород является акустико-эмиссионный метод. Он позволяет проводить интегральный контроль и обнаруживать динамику дефектов (микро- и макротрещин, проскальзываний, проявляющихся в виде отдельных акустических импульсов звукового диапазона частот) при деформировании среды. При этом источником сигнала служат сами исследуемые породы [2].

В результате многолетних исследований геоакустической эмиссии (ГАЭ) на Камчатском геодинамическом полигоне установлено существование высокочастотного (до первых десятков килогерц) акустоэмиссионного эффекта в приповерхностных осадочных породах. Данный эффект связан с активизацией деформаций приповерхностных осадочных пород на заключительной стадии подготовки землетрясений и заключается в краткосрочных резких изменениях характеристик геоакустического излучения [3–5].

Сигналы геоакустического излучения представляют собой комбинацию импульсов различной амплитуды, длительности (порядка 30–100 мс) и частоты заполнения (до 10 кГц), с крутым фронтом и плавным спадом. Частота следования импульсов варьируется от единиц в минуту до нескольких сотен в секунду в зависимости от напряженно-деформированного состояния пород.

Настоящая работа посвящена описанию способов локализации источников акустического излучения в приповерхностных осадочных породах с помощью распределенной системы комбинированных приемников. Такие приемники объединяют в себе всенаправленный приемник акустического давления и трехкомпонентный приемник градиента акустического давления, датчики которого расположены на взаимно ортогональных осях. Таким образом, в одной точке пространства синхронно регистрируются несколько параметров акустического поля. Это дает возможность восстановить пространственно-временное распределение вектора колебательной скорости частиц среды в волне, используя векторно-фазовые методы, и определить направление на источник сигнала [6].

Схема проведения эксперимента

Эксперимент по определению местоположения источников геоакустического излучения проводился в феврале 2023 года на оз. Микижа п-ов Камчатка. В это время толщина льда составила 0.75 м, расстояние от нижней кромки

льда до дна — 1.75 м. Для записи сигналов в озере была установлена система регистрации, состоящая из двух комбинированных приемников (vfp1, vfp3) и одного приемника акустического давления (p2) (рис. 1). Приемники были расставлены в горизонтальной плоскости по трем вершинам квадрата со стороной 2 м на высоте 1 м ото дна.

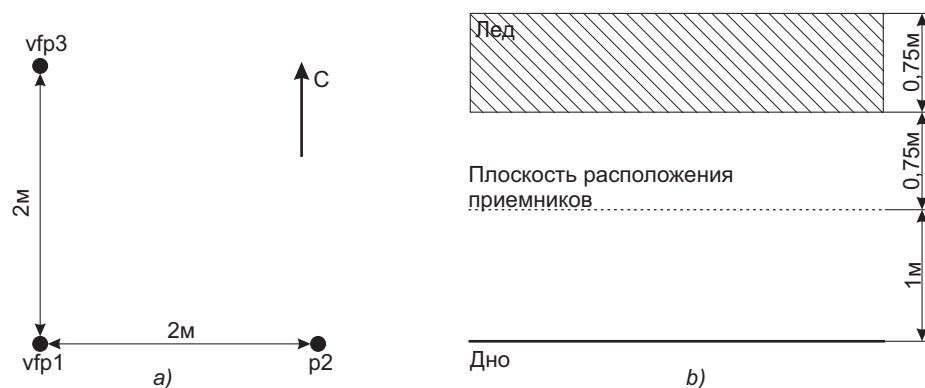


Рис. 1. Схема установки распределенной приемной акустической системы в горизонтальной плоскости (а), в вертикальной плоскости (б). vfp1 и vfp3 — комбинированные приемники, p2 — приемник акустического давления.

[Fig. 1. Installation diagram of a distributed receiving acoustic system in the horizontal plane (a), in the vertical plane (b). vfp1 and vfp3 are combined receivers, p2 is acoustic pressure receiver.]

Оцифровка сигнала производилась с помощью АЦП L-CardE502 с частотой дискретизации 96 кГц и разрядностью 16 бит, запись данных осуществлялась на диск мобильного компьютера непосредственно на месте проведения эксперимента.

Методы определения местоположения источников

Как было указано выше, в конструкцию комбинированных приемников включены всенаправленные датчики акустического давления. В совокупности с дополнительным датчиком акустического давления, созданная система регистрации представляет собой гидроакустическую антенную решетку. Это дало возможность одновременно применить для определения местоположения источников разностно-дальномерный метод и триангуляцию.

В ходе работы было установлено, что регистрируемый различными приемниками сигнал имеет достаточно существенные различия в волновой форме (рис. 2), обусловленные в большей степени неравномерностью диаграммы направленности излучения источников [7], в меньшей — различиями в условиях распространения и регистрации сигналов. Данное обстоятельство не позволило применить с необходимой надежностью корреляционные методы для определения задержки между сигналами с различных приемников, что

ограничило возможности применения методов пространственно-временной обработки сигналов [8].

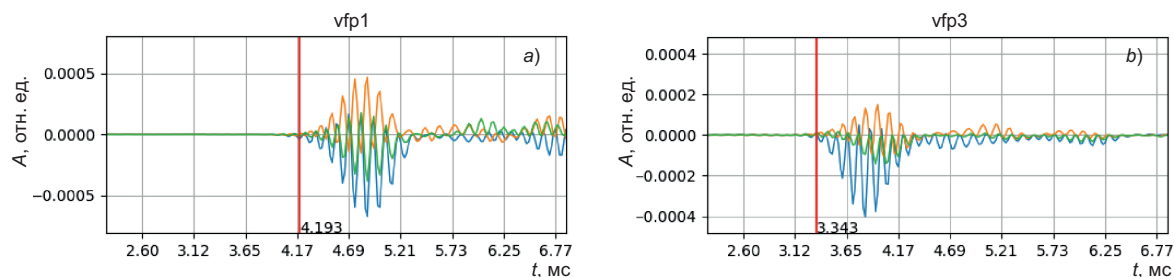


Рис. 2. Форма геоакустического импульса, зарегистрированного 2023.02.13 02:01:09.398 комбинированными приемниками vfp1 (a) и vfp3 (b). Компоненты вектора, коллинеарного вектору Умова-Пойнтинга: синяя линия — направление на запад, оранжевая — на север, зеленая — вертикально вверх. Красная линия — маркер начала импульса с отметкой времени относительно общего окна.

[Fig. 2. The shape of the geoacoustic pulse registered on 2023.02.13 02:01:09.398 by combined receivers vfp1 (a) and vfp3 (b). Components of the vector collinear to the Umov-Poynting vector: the blue line is the direction to the west, the orange is the direction to the north, the green is the direction vertically upwards. The red line is a marker of the beginning of the pulse with a time stamp relative to the general window.]

Определение местоположения источников сигнала с использованием метода триангуляции при наличии двух комбинированных приемников, разнесенных на известное расстояние, производится достаточно просто. Для этого на первом этапе из первоначального сигнала выделяется полоса частот 3–5 кГц. После этого производится расчет годографа вектора, коллинеарного вектору Умова-Пойнтинга, по которому можно установить направление на источник сигнала [9].

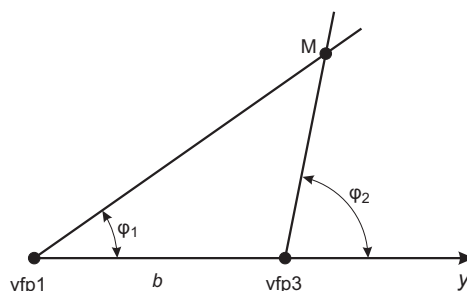


Рис. 3. Определение местоположения источника сигнала M методом триангуляции с использованием двух комбинированных приемников vfp1 и vfp3, разнесенных на расстояние b .

[Fig. 3. Localization of the M signal source by triangulation using two combined receivers vfp1 and vfp3 spaced at a distance of b .]

Далее определяются направления на источник сигнала для каждого приемника. Пересечение лучей, соответствующих полученным направлениям и построенным из центров приемников, определяет местоположение источника сигнала M (рис. 3, рис. 4).

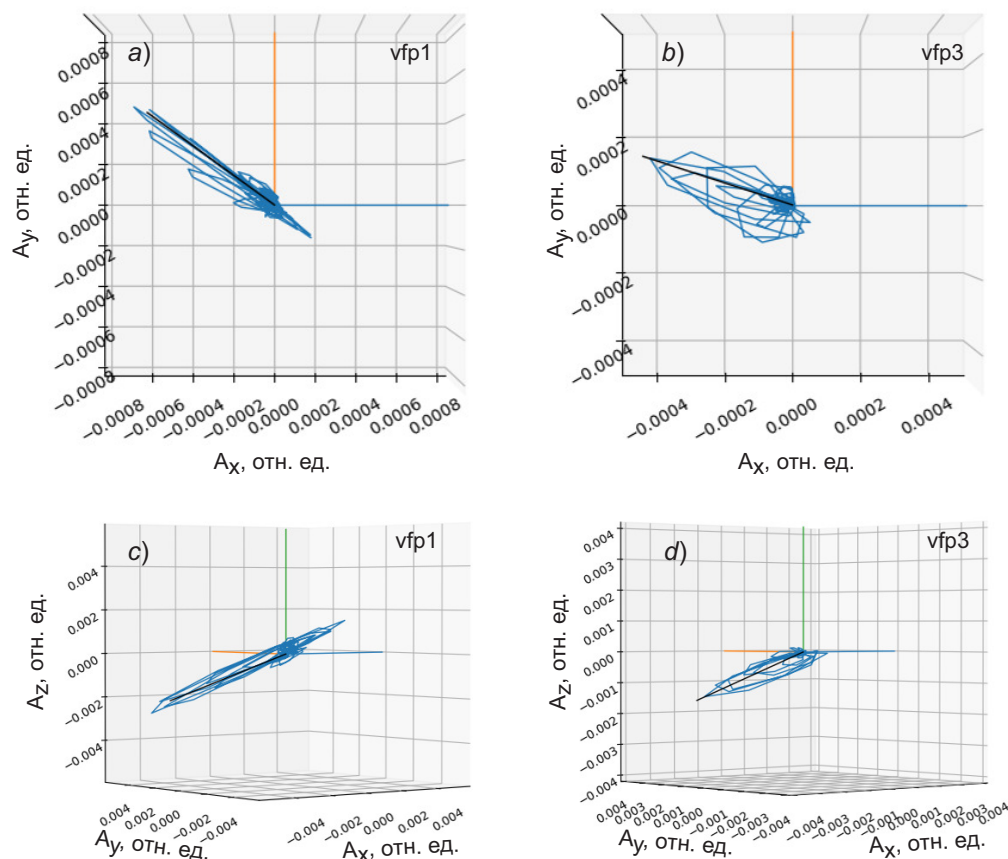


Рис. 4. Пример определения направления на источник геоакустического импульса, зарегистрированного 2023.02.13 в 02:01:09.398, комбинированными приемниками. (a),(b) — вид сверху; (c), (d) — вид сбоку.

[Fig. 4. An example of determining the direction to the source of a geoacoustic pulse registered on 2023.02.13 at 02:01:09.398 by combined receivers. (a) and (b) are the top views; (c) and (d) are the side views.]

Основным недостатком системы с двумя комбинированными приемниками является то, что она не способна локализовать источники, если они находятся вблизи прямой, проходящей через их центры. В этом случае лучи, выпущенные из приемников в сторону источника, будут практически параллельными, а расстояние до их пересечения будет сильно варьироваться в зависимости от малейшей погрешности в направлении.

Разностно-дальномерный метод основан на вычислении разности дальностей от источника до нескольких пар приемников, определяемой путем точного измерения времени прихода сигнала на регистрирующие компоненты системы. В пространственных координатах решение данной задачи сводится к поиску точки

пересечения нескольких гиперboloидных поверхностей положения источника, фокусы которых соответствуют парам приемников. Для обеспечения точных измерений необходимо как минимум четыре приемника, расставленных так, чтобы возможно было организовать три независимые пространственные базы [10]. Определение точки пересечения гиперboloидов производится аналитически либо итерационными методами наименьших квадратов либо многомерной оптимизации [11].

В нашем случае имеются две независимые пары точек ($vfr3-vfr1$ и $vfr1-p2$), позволяющие построить две гиперболические поверхности положения источника с перпендикулярно направленными осями. Третья пара ($vfr3-p2$) расположена в одной плоскости с первыми двумя, вследствие чего плохо подходит для решения пространственных задач. В связи с этим однозначное определение координат источников только с использованием данного метода и построенной приемной системы невозможно. Но полученных сведений достаточно для проверки достоверности работы метода триангуляции.

Как правило для автоматизированного определения задержки прихода сигнала используются корреляционные методы. Но из-за отличий в волновых формах импульсов, регистрируемых разными приемниками, данные методы показали неудовлетворительный результат. В связи с этим задержка определялась вручную либо по фронту импульса (моменту времени, когда сигнал начинал превышать фоновый уровень), либо по точкам его наибольшего значения. Оба подхода зависят от мгновенного значения амплитуды регистрируемой акустической волны, которая зависит от частоты и фазы колебания. В этом случае наиболее вероятная ошибка определения времени прихода импульса будет равна одному или нескольким периодам колебания, что при частоте заполнения импульса 4 кГц приведет к погрешности порядка 1 м на удалении 5 м перпендикулярно оси комбинированных приемников $vfr1-vfr3$ и 2.5 м на том же расстоянии, но по направлению 45° .

Учитывая уровни погрешности, а также то, что контролируемый объем пород ограничен нижней полусферой диаметром порядка нескольких десятков метров [12, 13], применять аналитические методы для решения уравнений пересечения гиперboloидов не целесообразно. В связи с этим был использован простой эмпирический метод определения местоположения источников сигнала. Для этого был условно выделен объем донных пород в виде прямоугольного параллелепипеда с размерами $20 \times 20 \times 10$ м, над центром которого располагался комбинированный приемник $vfr1$. Объем был разделен на равные кубы со стороной 0.5 м, обусловленной оценками размеров источников [12] и определенной выше точностью 1–2.5 м (рис. 5). С помощью компьютерной программы для каждого куба поочередно вычисляется значение функции:

$$c = c_{12} + c_{23} + c_{13},$$

где

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } |\Delta t_{pij} - \Delta t_{sij}| < t_{err} \\ 1, & \text{если } |\Delta t_{pij} - \Delta t_{sij}| \geq t_{err} \end{cases},$$

Δt_{pij} — расчетная взаимная задержка между приемниками i и j , Δt_{sij} — измеренная взаимная задержка между приемниками i и j , t_{err} — значение допустимой ошибки, соответствующей времени прохождения сигналом расстояния, равного 0.25 м (половина стороны куба).

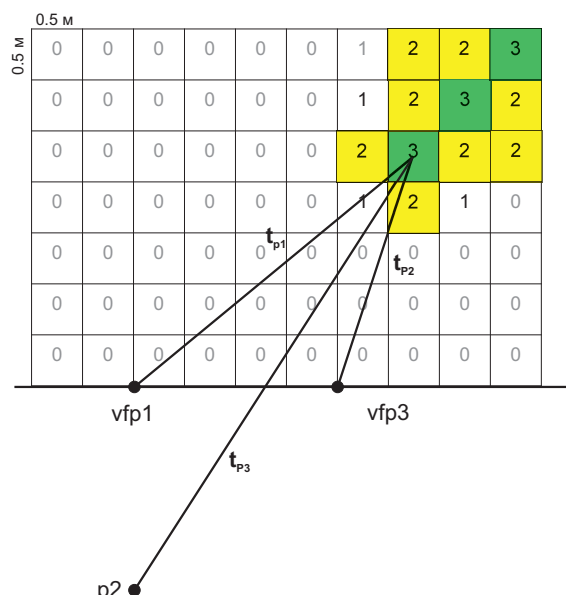


Рис. 5. Определение местоположения источников геоакустического сигнала эмпирической реализацией разностно-дальномерного метода. $tp1$, $tp2$, $tp3$ — расчетное время прохождения сигнала от исследуемого элемента контролируемого объема до соответствующего приемника. Зеленым цветом обозначены области, на которые достоверно определено направление с помощью трех пар приемников, желтым — двумя парами из трех приемников.

[Figure 5. Localization of geoacoustic signal sources by empirical implementation of the difference-rangefinder method. $tp1$, $tp2$, $tp3$ — estimated time of signal transmission from the investigated element of the controlled volume to the corresponding receiver. Green and yellow colors indicate areas the direction of which is reliably determined using three pairs of receivers and using two pairs of receivers, respectively.]

Значение $c = 3$ для какого-либо куба означает, что все три пары приемников зарегистрировали сигнал, исходящий из данного объема пород. В этом случае куб окрашивается в зеленый цвет. Если $c = 2$, то корректно определили направление только две пары приемников, цвет куба — желтый. Случаи $c < 2$ не рассматривались.

Результаты

Результаты работы реализованных разностно-дальномерного метода и триангуляции представлены на рис. 6.

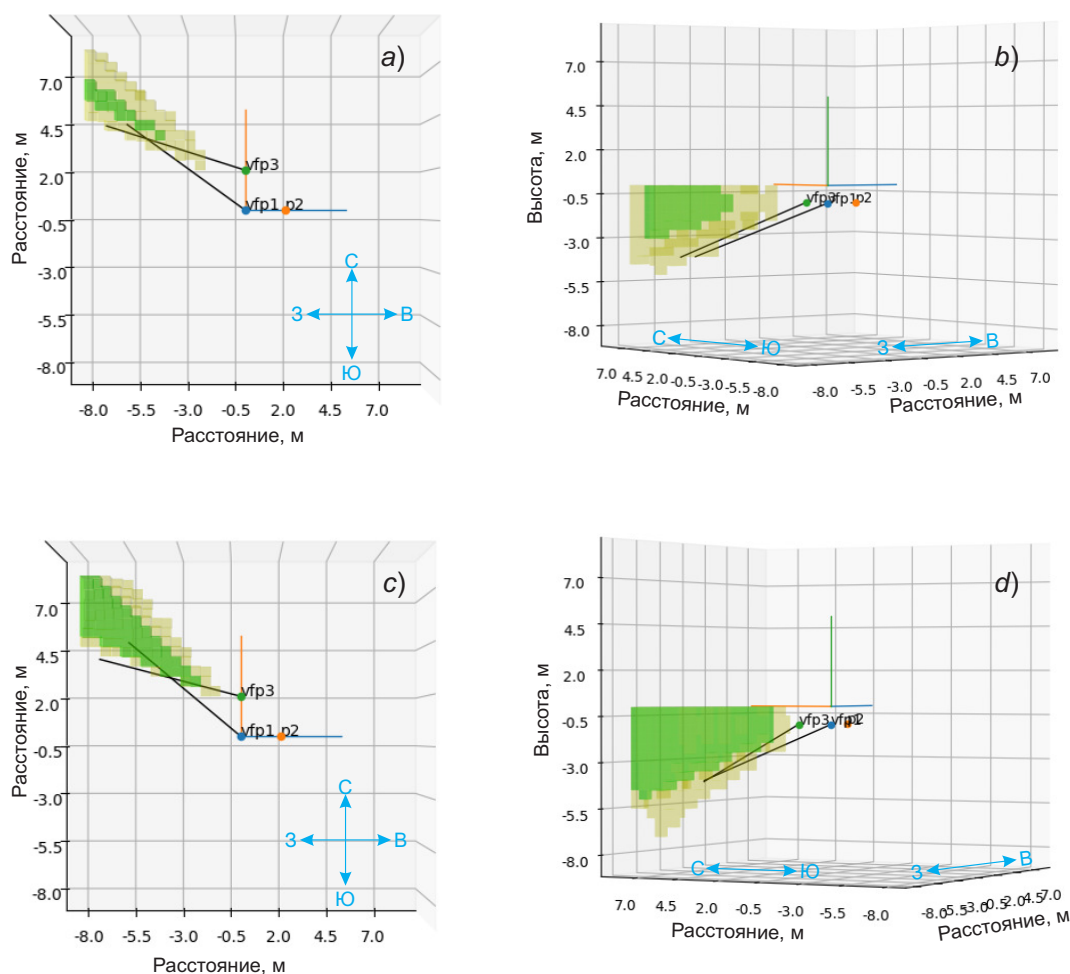


Рис. 6. Пример определения источников геоакустических сигналов методом триангуляции (черные лучи) и эмпирической реализацией разностно-дальномерного метода (зеленые и желтые области). Импульс, зарегистрированный 2023.02.13 в 02:01:09.398: а), б) — вид сверху и сбоку соответственно. Импульс, зарегистрированный 2023.02.13 в 02:01:18.927 с), д) — вид сверху и сбоку соответственно.

[Fig. 6. An example of localization the sources of geoacoustic signals by triangulation (black rays) and the empirical implementation of the difference-range-finder method (green and yellow areas). The pulse registered on 2023.02.13 at 02:01:09.398: (a) and (b) is a top and side view, respectively. The pulse registered on 2023.02.13 at 02:01:18.927 (c) and (d) is a top and side view, respectively.]

Видно, что полученные данные хорошо согласуются между собой. Пересечение лучей, соответствующих направлениям на источник сигнала находится в области, на которую достоверно определено направление с помощью трех или двух пар приемников. Точность примененных комбинированных приемников позволяет локализовать методом триангуляции источники излучения с погрешностью менее 0.5 м.

За время проведения эксперимента (105 минут) было зарегистрировано 43 высокочастотных геоакустических импульса. Для каждого из них описанными выше способами были измерены координаты источника. После этого были построены распределения источников в горизонтальной плоскости (рис. 7) и по глубине (рис. 8).

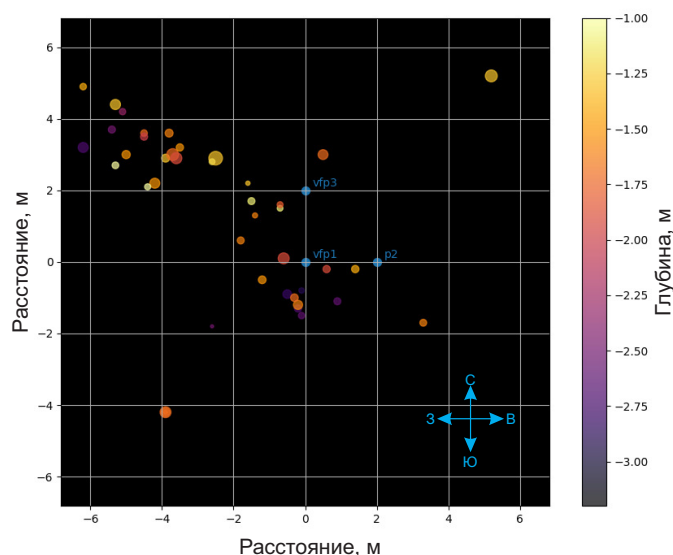


Рис. 7. Распределение источников сигнала в горизонтальной плоскости.

[Fig. 7. Distribution of signal sources in the horizontal plane.]

В результате анализа распределений установлено, что источники зарегистрированного геоакустического излучения расположены в донных породах на глубине до 2.20 ± 0.25 м на расстоянии до 8 ± 0.25 м от приемника.

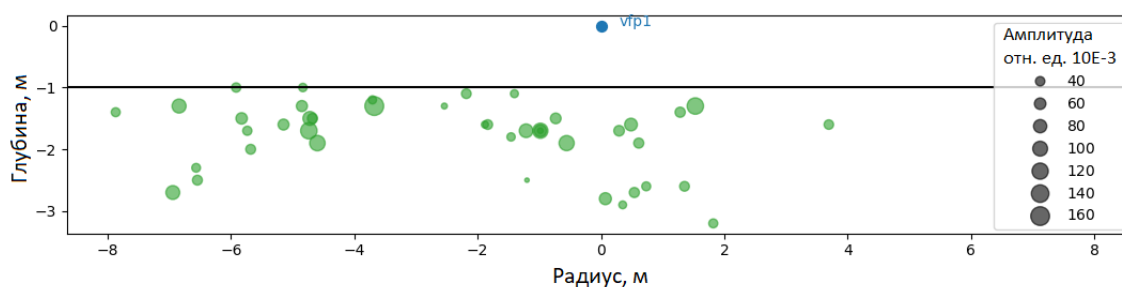


Рис. 8. Вертикальное сечение контролируемого объема пород по азимуту -55 градусов относительно комбинированного приемника vfp1.

[Fig. 8. The vertical cross-section of the controlled volume of rocks in azimuth is -55 degrees relative to the combined receiver vfp1.]

Заключение

В статье рассмотрены два метода определения местоположения источников высокочастотного геоакустического излучения, регистрируемого подводной распределенной акустической системой в оз. Микижа на Камчатке. В качестве датчиков использовались два комбинированных приемника, регистрирующих звуковое давление и три его градиента, и один приемник звукового давления. Реализованы метод триангуляции и разностно-дальномерный метод. Из-за конструктивных особенностей системы регистрации предложено использование обоих методов одновременно.

В результате применения методов измерены координаты источников геоакустического излучения в донных породах.

Данное исследование с целью проведения неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния пород может быть продолжено по двум направлениям. Первое направление заключается в упрощении системы регистрации и применении других методов локализации источника звука, например, угломерно-разностно-дальномерного метода. Второе — в использовании системы регистрации, состоящей как минимум из четырех приемников, для увеличения надежности методов, описанных в работе, так как локализация каждого источника будет основываться на значительно большем количестве измерений.

Благодарность

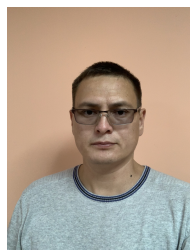
Авторы выражают благодарность ведущим инженерам лаборатории акустических исследований ИКИР ДВО РАН Васькину А.А. и Торгонскому В.Е. за помощь в организации и проведении эксперимента.

Список литературы

1. Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К. *Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности. и риска в 1998-2009 гг.* М.: Светоч плюс, 2011. 304 с.
2. Paparo G., Gregori G. P., Coppa U., DeRitis R., Taloni A. Acoustic emission (AE) as a diagnostic tool in geophysics, *Annals of geophysics*, 2002. vol. 45, no. 2, pp. 401–416, DOI: 10.4401/ag-3511.
3. Долгих Г.И., Купцов А.В., Ларионов И.А., Марапулец Ю.В., Швец В.А., Шевцов В.М., Широков О.П., Чупин В.А., Яковенко С.В. Деформационные и акустические предвестники землетрясений, *Доклады академии наук*, 2007. Т. 413, № 1, С. 96–100.
4. Марапулец Ю.В. Высокочастотный акустоэмиссионный эффект, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2015. Т. 10, № 1, С. 44–53, DOI: 10.18454/2079-6641-2015-10-1-44-53.
5. Lukovenkova O., Marapulets Yu., Solodchuk A. Adaptive Approach to Time-Frequency Analysis of AE Signals of Rocks, *Sensors*, 2022. vol. 22, pp. 9798, DOI: 10.3390/s22249798.
6. Гордиенко В. А. *Векторно-фазовые методы в акустике*. М.: Физматлит, 2007. 480 с.
7. Марапулец Ю.В., Щербина А.О. Оценка ориентации оси наибольшего сжатия пород с использованием точечной приемной системы на основе комбинированного приемника, *Акустический журнал*, 2018. Т. 64, № 6, С. 703–711, DOI: 10.1134/S0320791918060096.

8. Гусев В.Г. *Системы пространственно-временной обработки гидроакустической информации*. Л.: Судостроение, 1988. 264 с.
9. Shcherbina A., Solodchuk A. Improved algorithm for detecting pulses in geoacoustic emission signals recorded by a combined receiver in Kamchatka, *AIP Conf. Proc.*, 2023. vol. 2910, no. 1, pp. 020137, DOI: 10.1063/5.017529.
10. Аль-Одхари А.Х., Фокин Г.А., Федоренко И.В., Рябенко Д.С., Лавров С.В. Исследование влияния геометрического распределения пунктов приема и источника радиоизлучения на точность позиционирования, *Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С*, 2017. № 4, С. 7.
11. Гринь И.В., Ершов Р.А., Морозов О.А., Фидельман В.Р. Оценка координат источника радиоизлучения на основе решения линеаризованной системы уравнений разностно-дальномерного метода, *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*, 2014. Т. 32, № 4, С. 71–81.
12. Марапулец Ю.В., Шевцов В.М. *Мезомасштабная акустическая эмиссия*. Владивосток: Дальнаука, 2012. 126 с.
13. Shcherbina A., Solodchuk A. Estimation of the power of geoacoustic emission sources registered in Mikizha Lake, Kamchatka region, *E3S Web of Conferences*, 2019. vol. 127, pp. 03003 DOI: 10.1051/e3sconf/201912703003.

Информация об авторах



Щербина Альберт Олегович ✉ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия, ORCID 0000-0002-7236-161X.



Солодчук Александра Андреевна ✉ – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории акустических исследований, Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Россия ORCID 0000-0002-6761-8978.

Information about authors



Shcherbina Albert Olegovich ✉ – Ph. D. (Phys. & Math.), Senior Researcher, Laboratory of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia, ORCID 0000-0002-7236-161X.



Solodchuk Alexandra Andreevna ✉ – Ph. D. (Phys. & Math.), Senior Researcher, Laboratory of Acoustic Research, Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia, ORCID 0000-0002-6761-8978.

References

- [1] Chebrov V.N., Saltykov V.A., Serafimova Yu.K. Prognozirovanie zemletryaseniya na Kamchatke. Po materialam raboty Kamchatskogo filiala Rossiyskogo ekspertnogo soveta po prognozu zemletryaseniya, otsenke seysmicheskoy opasnosti. i riska v 1998-2009 gg. [Earthquake forecasting in Kamchatka. Based on the materials of the Kamchatka branch of the Russian Expert Council on Earthquake Prediction, Seismic Hazard and Risk Assessment in 1998-2009]. Moscow, Svetoch Plus, 2011, 304 p.(In Russian).
- [2] Paparo G., Gregori G.P., Coppa U., DeRitis R., Taloni A. Acoustic emission (AE) as a diagnostic tool in geophysics, *Annals of geophysics*, 2002, vol. 45, no. 2, pp. 401–416. DOI: 10.4401/ag-3511
- [3] Dolgikh G.I., Shvets V.A., Chupin V.A., Yakovenko S.V., Kuptsov A.V., Larionov I.A., Marapulets Y.V., Shevtsov B.M., Shirokov O.P. Deformation and acoustic precursors of earthquakes, *Doklady Earth Sciences*, 2007, vol. 413, no. 1, pp. 281–285. DOI: 10.1134/S1028334X07020341.
- [4] Marapulets Yu.V. High-frequency acoustic emission effect, *Bulletin KRASEC. Phys. & Math. Sci*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 39–48. DOI: 10.18454/2313-0156-2015-10-1-39-48.
- [5] Lukovenkova O., Marapulets Yu., Solodchuk A. Adaptive Approach to Time-Frequency Analysis of AE Signals of Rocks, *Sensors*, 2022, vol. 22, art. no. 9798. DOI: 10.3390/s22249798.
- [6] Gordienko V.A. Vektorno-fazovyye metody v akustike [Vector phase methods in acoustics]. Moscow, Fizmatlit, 2007, 480 p.(In Russian.).
- [7] Marapulets Y.V., Shcherbina A.O. Assessing the orientation of the axis of maximum compression of rocks with a combined point receiver system, *Acoustical Physics*, 2018, vol. 64, no. 6, pp. 742–749. DOI: 10.1134/S106377101806009X.
- [8] Gusev V.G. Sistemy prostranstvenno-vremennoy obrabotki gidroakusticheskoy informatsii [Systems of spatio-temporal processing of hydroacoustic information]. Leningrad, Sudostroenie, 1988, 264 p.(In Russian).
- [9] Shcherbina A., Solodchuk A. Improved algorithm for detecting pulses in geoacoustic emission signals recorded by a combined receiver in Kamchatka, *AIP Conf. Proc.*, vol. 2910, no. 1, art. no. 020137. DOI: 10.1063/5.0175290.
- [10] Al-Odhari A.H., Fokin G., Fedorenko I., Ryabenko D., Lavrov S. Issledovanie vliyaniya geometricheskogo raspredeleniya punktov priema i istochnika radioizlucheniya na tochnost' pozitsionirovaniya [Research of influence of geometrical distribution of points of reception and radio emission source on accuracy of positioning], *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki*, 2017, vol. 4, pp. 2–7.(In Russian).
- [11] Grin' I.V., Ershov R.A., Morozov O.A., Fidel'man V.R. Otsenka koordinat istochnika radioizlucheniya na osnove resheniya linearizovannoy sistemy uravneniy raznostno-dal'nomernogo metoda [Evaluation of radio source's coordinates based on solution of linearized system of equations by range-difference method], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2014, vol. 32, no. 4, pp. 71–81.(In Russian).
- [12] Marapulets Yu.V., Shevtsov B.M. Mezomasshtabnaya akusticheskaya emissiya [Mesoscale acoustic emission]. Vladivostok, Dalnauka, 2012, 126 p.(In Russian).
- [13] Shcherbina A., Solodchuk A. Estimation of the power of geoacoustic emission sources registered in Mikizha Lake, Kamchatka region, *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 127, art. no. 03003. DOI: 10.1051/e3sconf/201912703003