



АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ И ЛОКАЦИИ  
ИНФРАЗВУКОВЫХ СОБЫТИЙ В СИСТЕМЕ PSDLВ. Э. Асминг<sup>1</sup>  и А. В. Федоров<sup>\*,1</sup> <sup>1</sup>Кольский филиал ФИЦ ЕГС РАН, Апатиты, Россия\* **Контакт:** Андрей Викторович Федоров, Afedorov@krsc.ru

В работе представлено описание автоматизированной системы и реализованных в ней алгоритмов для обнаружения, ассоциации и локации низкочастотных акустических событий по данным инфразвуковых групп. Описан алгоритм обнаружения инфразвуковых сигналов методом расчета функции взаимной корреляции между записями отдельных датчиков группы. Реализованный алгоритм оптимизирован для работы с группами, состоящими из большого количества сенсоров, что позволяет минимизировать вычислительную нагрузку на систему мониторинга в режиме, близком к реальному времени. Описана процедура распознавания длительных сигналов с возможно меняющимся во времени положением источника, таких как движущийся транспорт или снежные лавины. Также в работе приводится описание алгоритмов ассоциации инфразвуковых сигналов, зарегистрированных разными группами, а также локации источника сигнала по данным нескольких инфразвуковых групп. Система способна анализировать одновременно данные сейсмического и инфразвукового мониторинга и обнаруживать пары сигналов двух видов, ассоциируемых с общим источником. Алгоритм такой ассоциации также приведен в работе. Описанная система автоматического обнаружения и локации инфразвуковых сигналов может быть применена для мониторинга опасных природных и техногенных процессов и явлений в режиме, близком к реальному времени.

**Ключевые слова:** инфразвуковой сигнал, инфразвуковая группа, детектирование, локация, кросс-корреляция.

**Цитирование:** Асминг, В. Э., А. В. Федоров Алгоритмы автоматического детектирования и локации инфразвуковых событий в системе PSDL // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES6002. — DOI: 10.2205/2024es000944 — EDN: ZVUUJP

### Введение

Многие опасные природные и техногенные явления сопровождаются как сейсмическими, так и акустическими сигналами. Наиболее распространенный класс таких событий – это взрывы различной природы – от промышленных [Arrowsmith et al., 2008] до ядерных [Koch and Pilger, 2018]. Также инфразвуковые волны, наряду с сейсмическими, порождаются сильными землетрясениями [Mutschlecner and Whitaker, 2005], извержениями вулканов [Le Pichon et al., 2005], льдотрясениями и процессами откола айсбергов [Асминг и др., 2016; Виноградов и др., 2021]. Пролеты сверхзвуковых летательных аппаратов [Liszka and Waldemark, 1995] и болидов [Ens et al., 2012] также порождают сильные инфразвуковые волны.

Для мониторинга низкочастотных акустических сигналов используются инфразвуковые группы (наборы разнесенных в пространстве низкочастотных микрофонов или микробарографов) [Gibbons et al., 2015]. Апертуры инфразвуковых групп варьируют от первых сотен метров до первых километров. Примеры конфигураций инфразвуковых групп, установленных в Северной Европе, показаны на рис. 1 (буквенно-числовой код обозначает международный код станции).

<https://elibrary.ru/zvuujp>

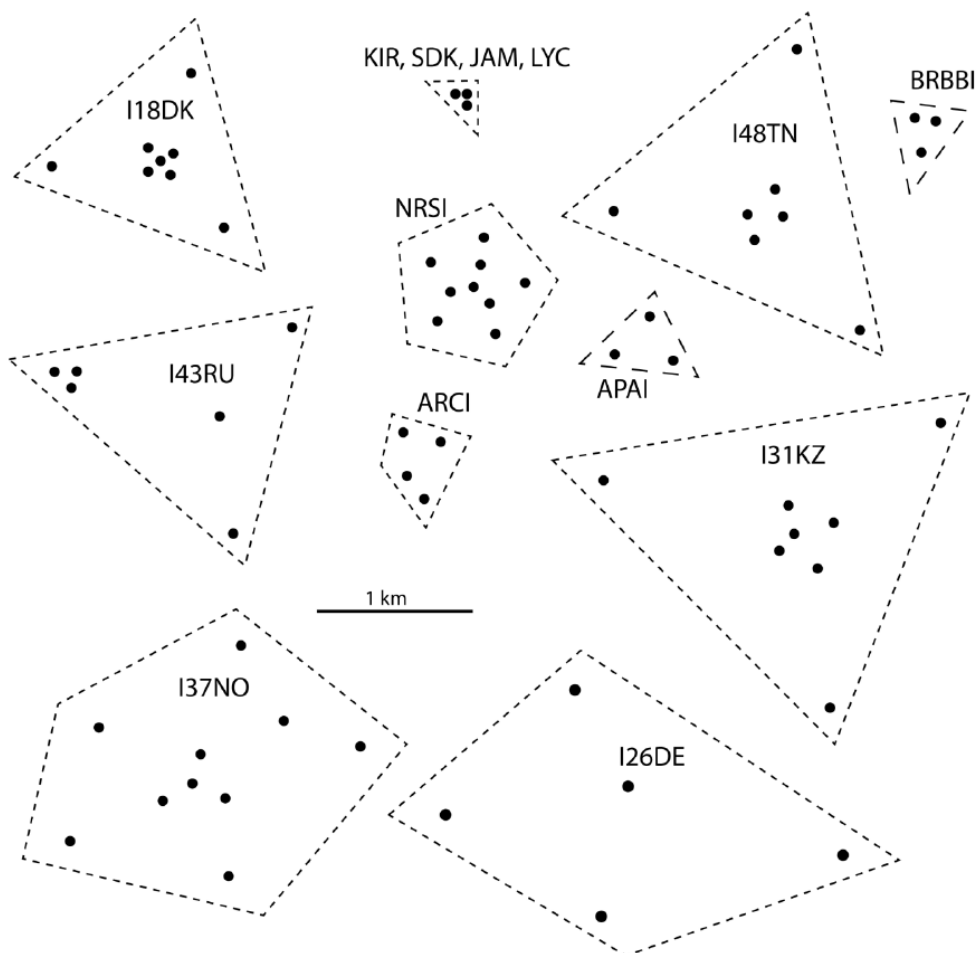
Получено: 4 октября 2024 г.

Принято: 23 октября 2024 г.

Опубликовано: 30 декабря 2024 г.



© 2024. Коллектив авторов.



**Рис. 1.** Конфигурации различных инфразвуковых групп, установленных в Северной Европе [Gibbons et al., 2015].

Перечень задач, которые решаются сетями инфразвукового наблюдения, включает в себя не только вопросы мониторинга природных и техногенных процессов и явлений. По данным регистрации инфразвука зондируется строение атмосферы на трассах распространения инфразвукового сигнала, изучаются глобальные планетарные атмосферные циркуляции и их аномалии, такие, например, как внезапное стратосферное потепление [Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies: Challenges in Middle Atmosphere Dynamics and Societal Benefits, 2019].

Для решения такого широкого круга задач, связанных с инфразвуковыми наблюдениями, крайне важно максимально автоматизировать процессы обнаружения и первичного анализа целевых сигналов. Создание автоматизированных систем инфразвукового и сейсмоинфразвукового мониторинга, характеризующихся высокой достоверностью результатов, позволит в режиме близком к реальному времени решать прикладные задачи связанные с наблюдением за опасными природными явлениями и оперативным реагированием на них.

В 2022–2024 годах в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН была разработана потоковая система автоматического детектирования и локации (ПСДЛ/PSDL), предназначенная для организации сейсмического и инфразвукового мониторинга произвольных регионов [Асминг и Асминг, 2022].

Система включает в себя две подсистемы – детектирования и локации сейсмических и инфразвуковых событий. Эти подсистемы взаимосвязаны – в случае, когда за сейсмическим сигналом следует соответствующий ему инфразвуковой, происходит их ассоциация.

В настоящее время система рутинно используется в ФИЦ ЕГС РАН для решения следующих задач:

- обработка данных сети сейсмических и инфразвуковых станций, включающей станции Кольского полуострова, северной Норвегии и Финляндии;
- обработка сейсмических и инфразвуковых данных сети архипелага Шпицберген. Обнаруживаются и лоцируются землетрясения, льдотрясения, отколы айсбергов, микробаромы и т.д.;
- обработка данных сейсмоинфразвуковой группы, расположенной на архипелаге Земля Франца-Иосифа для изучения процессов деструкции местных ледников;
- обработка инфразвуковых данных трех инфразвуковых групп, расположенных в Хибинском горном массиве и его окрестностях. Система позволяет обнаруживать промышленные взрывы и сходы снежных лавин.

Решение задачи автоматизации дистанционного мониторинга снежных лавин и дискриминации событий этого класса от событий иной природы также во многом может быть найдено в комплексировании анализа инфразвуковых и сейсмических сигналов. Отчасти эта работа посвящена решению именно таких задач, когда совместный анализ сейсмических и инфразвуковых записей позволяет получать дополнительную информацию для автоматизации процессов классификации событий по природе их генерации.

Упомянутый выше программный комплекс PSDL включает в себя четыре модуля. Первый – NSS (New Single Station), обрабатывает данные отдельных сейсмических станций или групп. Для каждой станции запускается отдельный экземпляр модуля, все они работают параллельно. Второй программный модуль – NAS (New ASsociation), ассоциирует результаты работы модулей NSS, лоцирует сейсмические события по сети станций, производит вероятностную оценку типов сейсмических событий. Третий – модуль быстрого инфразвукового детектирования QACD (Quick ACoustic Detector). Один экземпляр модуля обрабатывает данные одной инфразвуковой группы, все экземпляры работают параллельно. Четвертый модуль – ASIS (ASsociation of Infrasound Signals), обобщает данные, полученные от экземпляров QACD и лоцирует инфразвуковые события по сети.

Информация о сейсмических событиях, обнаруженных модулями NSS и NAS, передается в инфразвуковые модули. Если инфразвуковому событию соответствует сейсмическое, между ними производится ассоциация.

В настоящей статье рассматриваются алгоритмы детектирования инфразвуковых событий отдельными группами, ассоциации событий по нескольким группам, локации событий и оценок ошибок локации, которые реализованы в модулях QACD и ASIS программы PSDL.

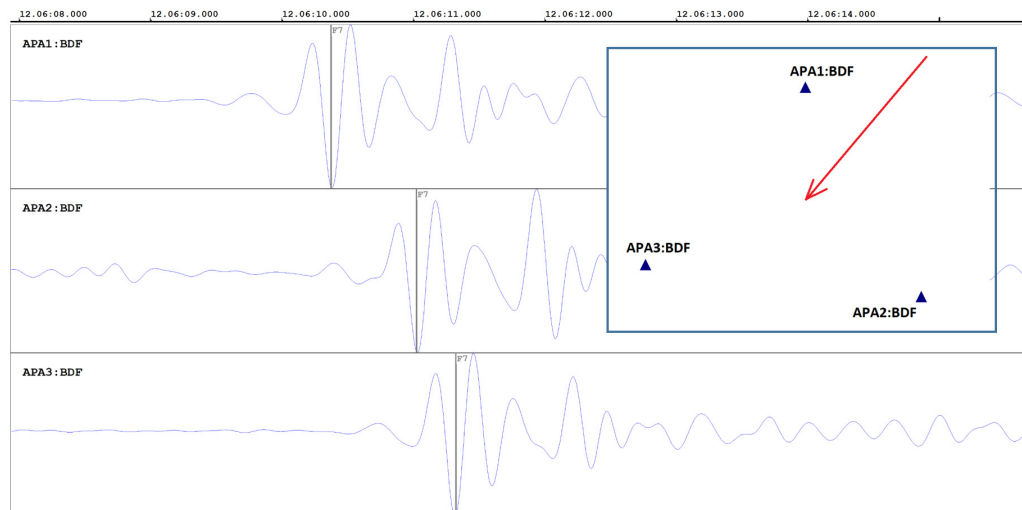
### Детектирование инфразвуковых событий

Когда инфразвуковой сигнал приходит на группу с расстояния, намного большего, чем апертура группы, его можно рассматривать в приближении плоской волны. В этом случае записи на разных датчиках группы похожи, но сдвинуты друг относительно друга по времени (рис. 2). Если известны временные сдвиги между приходами сигналов на разные датчики группы, по ним можно рассчитать азимут подхода сигнала и кажущуюся скорость подхода (кажущаяся скорость – отношение  $V_{\text{звука}}/\cos(\beta)$ , где  $\beta$  – угол падения волны к дневной поверхности).

Важным параметром в детектировании и локации инфразвуковых сигналов является кросс-корреляция записей разных датчиков группы. Определим кросс-корреляцию каналов в зависимости от предполагаемого азимута прихода волны  $\alpha$  и кажущейся скорости  $v$ :

$$C(\alpha, v) = \sum_{i,j} \text{Corr}(S_i(t - \Delta t_i(\alpha, v)), S_j(t - \Delta t_j(\alpha, v))),$$

где  $i, j$  – индексы датчиков,  $S_i(t)$  – запись на  $i$ -м датчике,  $\Delta t(\alpha, v)$  – сдвиг относительно центра группы в зависимости от азимута и кажущейся скорости. Корреляция (Corr) считается для временного интервала  $[t_1, t_2]$ .



**Рис. 2.** Запись инфразвукового сигнала на датчиках Апатитской группы (АРА). Записи имеют высокое подобие, но сдвинуты по времени. По сдвигам сигнала на разных каналах определен азимут подхода волны. Красной стрелкой показано направление прихода волны.

Детектирование с помощью кросс-корреляции будет заключаться в поиске  $\max_{\alpha, v} C(\alpha, v)$  для каждого небольшого временного окна. Если этот максимум превысит определенный порог, инфразвуковое событие может считаться обнаруженным, а значения  $\alpha$  и  $v$ , на которых максимум достигнут, и будут оценками азимута на источник и кажущейся скорости для данного временного окна.

На практике сигналы, записанные датчиками, расположенными близко друг к другу, имеют более высокую корреляцию, чем записанные удаленными датчиками одной и той же группы. Это хорошо заметно при работе с данными инфразвуковых групп больших апертур (от 0,5 км и выше).

Для учета этого эффекта при работе с такими инфразвуковыми группами авторами было предложено учитывать попарные корреляции с весами, уменьшающимися с расстоянием между датчиками:

$$C(\alpha, v) = \frac{\sum_{i,j} w(R_{i,j}) \text{Corr}(S_i(t - \Delta t_i(\alpha, v)), S_j(t - \Delta t_j(\alpha, v)))}{\sum_{i,j} w(R_{i,j})}$$

Здесь  $w(R_{i,j})$  – эмпирическая весовая функция, зависящая от расстояния между парой датчиков  $R_{i,j}$ .

Аналогичным образом введем функцию  $G$  (gain), имеющую смысл выигрыша в амплитуде при суммировании каналов инфразвуковой группы со сдвигами на интервале  $[t_1, t_2]$ :

$$G_{ij}(\alpha, v) = \frac{\max_{t \in [t_1, t_2]} (S_i(t - \Delta t_i(\alpha, v)) + S_j(t - \Delta t_j(\alpha, v)))}{2 \max(\max_{t \in [t_1, t_2]} S_i, \max_{t \in [t_1, t_2]} S_j)} \tag{1}$$

$$G(\alpha, v) = \frac{\sum_{i,j} w(R_{i,j}) G_{ij}(\alpha, v)}{\sum_{i,j} w(R_{i,j})}$$

Введем аналогично функцию амплитуды  $A(\alpha, v)$  на интервале  $[t_1, t_2]$ :

$$A_{ij}(\alpha, v) = \frac{1}{2} \max_{t \in [t_1, t_2]} |S_i(t + \Delta t_i(\alpha, v)) + S_j(t + \Delta t_j(\alpha, v))| \tag{2}$$

$$A(\alpha, v) = \frac{\sum_{i,j} w(R_{i,j}) A_{ij}(\alpha, v)}{\sum_{i,j} w(R_{i,j})}$$

Рассмотрим теперь процедуру детектирования в том виде, как она реализована в программе PSDL. Исследуемый фрагмент данных разбивается на короткие (длительностью 2–3 сек) временные окна и для каждого положения окна рассчитываются параметры  $C(\alpha, \nu)$  (корреляция),  $G(\alpha, \nu)$  (gain) и  $A(\alpha, \nu)$  (амплитуда) для большого количества наборов углов и кажущихся скоростей  $(\alpha, \nu)$  (о выборе этих наборов будет сказано ниже).

Будем считать, что во временном окне обнаружен сигнал, если для какой-либо пары азимута и скорости  $(\alpha, \nu)$  выполняется одно из следующих условий:

$$(C(\alpha, \nu) > C_0) \& (G(\alpha, \nu) > G_0) \& (A(\alpha, \nu)/A_{\text{шум}} > A_0) \quad (3)$$

или

$$(C(\alpha, \nu)G(\alpha, \nu) > C_0G_0) \& (A(\alpha, \nu)/A_{\text{шум}} > A_0), \quad (4)$$

где  $C_0$  – порог по корреляции,  $G_0$  – порог по амплитудному выигрышу,  $A_0$  – порог по отношению сигнал/шум (об оценке уровня шума  $A_{\text{шум}}$  будет сказано ниже).

В качестве параметров сигнала в этом случае берутся те  $(\alpha, \nu)$ , на которых достигается максимум  $C(\alpha, \nu)G(\alpha, \nu)$ .

Расчет по формулам, (1) и (2) для всех пар датчиков может быть вычислительно затратен. Например, для группы, состоящей из четырёх датчиков, необходимо учесть шесть пар. На практике достаточно из всех пар выбрать две – наиболее близких датчиков. В случае высокой корреляции на этих двух парах можно посчитать и общую корреляцию по всем. Если корреляция по двум парам будет низкой, то и по всем парам она окажется низкой, и вычислять ее не будет необходимости.

Таким образом, детектирование инфразвуковых сигналов в программе PSDL производится в два этапа. На первом рассчитываются корреляции, амплитудные выигрыши и амплитуды для минимальных наборов пар датчиков. Если проверка пройдена, т.е. выполнены условия (3) или (4), производится расчет уже по полному набору пар датчиков для уточнения параметров сигнала.

Такой алгоритм детектирования является эффективной альтернативой известного метода РМСС (Progressive Multi-Channel Correlation) [Cansi and Le Pichon, 2008].

### Оценка уровня шума

Как сказано выше, для каждого положения короткого окна считается амплитуда  $A_i$ , здесь  $i$  – индекс (номер) скользящего окна. В конфигурационном файле программы задается число окон  $N$ , по которым рассчитывается шум.

Для первых  $N$  окон за шум принимается средняя амплитуда в этих окнах:

$$A_{\text{шум}}(N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i.$$

С появлением новой амплитуды шум пересчитывается:

$$A_{\text{шум}}(K+1) = \frac{(N-1)A_{\text{шум}}(K) + A_{K+1}}{N}. \quad (5)$$

После того, как в окне обнаружен сигнал (выполнены условия (3) или (4)) обновление шума по формуле (5) отключается до тех пор, пока не закончится сигнал.

### Объединение фрагментов в сигнал

Запись инфразвукового сигнала может содержаться в нескольких коротких окнах, сигнал может прерываться или временно затухать. В длительных сигналах, генерируемых движущимся источником, может со временем меняться азимут на источник. Для анализа таких сложных случаев и корректного объединения окон, содержащих продолжительный сигнал, используется следующий подход. Вначале в списке обработанных окон выбирается «активное» окно, это окно не должно являться последним в списке.

Далее начинается анализ окон слева и справа от него в поисках окон, полностью совместимых с данным. Под «полностью совместимым» окном понимается окно, в котором также превышены пороги по корреляции и выигрышу, а азимуты и время отличаются от исходных не больше, чем на предварительно заданные в конфигурационном файле величины. Интервал между первым и последним полностью совместимыми окнами считается интервалом события.

По всем участкам, объединенным в единый сигнал, вычисляется диапазон азимутов и рассчитывается изменение азимута за время прохождения сигнала. Оно может оказаться больше максимального расхождения по азимуту, заданного пользователем.

Иногда возникают ситуации, при которых внутри выделенного таким образом интервала (события) есть фрагменты с другими параметрами, также претендующие на роль событий (т.е. имеющие высокие значения корреляции и выигрыша). Возможен режим работы программы, в котором такие фрагменты рассматриваются как отдельные события.

### **Ассоциация с сейсмическими событиями**

В PSDL локация сейсмических событий происходит как при одностанционной обработке в модуле NSS, так и после ассоциации при многостанционной обработке в модуле NAS. В различных конфигурациях программы ассоциация инфразвуковых сигналов может выполняться как с результатами одностанционной, так и сетевой обработки сейсмических данных.

Параметры ассоциации задаются в конфигурационном файле программы. Это максимальное расхождение азимутов  $\Delta\alpha$ , а также минимальные и максимальные скорости пробега звуковой волны (celerities) –  $c_0$  и  $c_1$ .

Пусть инфразвуковой группой с координатами  $(\varphi_g, \lambda_g)$  было зарегистрировано событие, записанное в отрезок времени  $[t_{g0}, t_{g1}]$ , азимуты на источник, рассчитанные для этого события по этой группе, находятся в интервале  $[\alpha_{g0}, \alpha_{g1}]$ . Опишем процедуру ассоциации этого инфразвукового события с сейсмическим, произошедшим в точке с координатами  $(\varphi, \lambda)$  в момент времени  $t_0$ .

Обозначим  $d = \text{Dist}(\varphi_g, \lambda_g, \varphi, \lambda)$  – расстояние между сейсмическим событием и инфразвуковой группой,  $\alpha$  – азимут из инфразвуковой группы на сейсмическое событие.

Инфразвуковое событие будем считать ассоциированным с данным сейсмическим, если:

$$\left[ t_0 - \frac{d}{c_1}, t_0 - \frac{d}{c_0} \right] \cap [t_{g0}, t_{g1}] \neq \emptyset$$

и

$$[\alpha - \Delta\alpha, \alpha + \Delta\alpha] \cap [\alpha_{g0}, \alpha_{g1}] \neq \emptyset.$$

В этом случае инфразвуковому событию приписываются координаты сейсмического, а в бюллетень и в базу данных добавляется информация об ассоциации.

### **Предварительный расчет, оценка неустраняемых ошибок определения азимутов**

В начале работы программа производит подготовительный расчет. При этом программа перебирает азимуты с маленьким шагом  $\Delta\alpha$  и скорости от  $V_0$  до  $V_1$  с маленьким шагом  $\Delta V$ . Для каждого варианта  $(\alpha, V)$  рассчитываются целочисленные сдвиги по времени сигналов, приходящих на датчики, относительно центра группы. Сдвиги вычисляются в отсчетах, поэтому возможны ситуации, когда одни и те же значения сдвигов получаются для нескольких разных  $(\alpha_i, V_i)$ . В этом случае для этого набора сдвигов запоминаются средние значения азимутов и скоростей, а также диапазон ошибок по азимуту и скорости. К ошибкам по азимуту прибавляется  $\Delta\alpha/2$  – ошибка за счет дискретности перебора азимутов.

Таким образом, после предварительного расчета для первого и второго проходов детектора хранятся следующие наборы данных –  $(\Delta t_1, \dots, \Delta t_N, \alpha_{\text{центр}}, \delta\alpha, V_{\text{центр}}, \delta V)$ , где  $\Delta t$  – целочисленные сдвиги каналов по времени относительно центра группы

в отсчетах,  $(\alpha, V_{\text{центр}})$  – средний азимут и кажущаяся скорость, соответствующая этим сдвигам,  $(\delta\alpha, \delta V)$  – неустраняемые ошибки определения азимута и кажущейся скорости.

Отметим, что число этих наборов (вариантов сдвигов каналов) оказывается меньше, чем число перебираемых при начальном расчете пар  $(\alpha, V)$ , потому что один и тот же вариант может соответствовать нескольким разным значениям  $(\alpha, V)$ .

### Ассоциация сигналов по нескольким инфразвуковым группам

#### Выбор наборов фаз

В результате работы модулей инфразвукового детектирования QACD формируется информация о приходах сигналов на станции (далее – о фазах). Для каждого прихода ( $i$  – индекс прихода) обозначим  $[t_{i0}, t_{i1}]$  – интервал времени прихода сигнала на станцию,  $N_i$  – номер станции, на которой обнаружен приход,  $[\alpha_{i0}, \alpha_{i1}]$  – диапазон азимутов прихода сигнала.

Процедура ассоциации выполняется каждый раз после того, как обнаруживается новая фаза. Вначале из списка ранее обнаруженных фаз выбираются все, которые совместимы с новой, т.е. могут в принципе быть порождены одним и тем же инфразвуковым событием. Это делается только по временам фаз. Для совместимости фаз 1 и 2 необходимо, чтобы для каких либо времен  $t_1 \in [t_{10}, t_{11}]$  и  $t_2 \in [t_{20}, t_{21}]$  выполнялось условие

$$|t_1 - t_2| < \frac{d_{12}}{c_{\min}}, \quad (6)$$

где  $d_{12}$  – расстояние между станциями 1 и 2,  $c_{\min}$  – минимальное значение скорости пробега (в смысле celerity) звука на расстоянии предполагаемой локации.

Обратим внимание, что (6) задает широкие рамки совместимости. Не все отобранные таким образом фазы в конечном итоге окажутся ассоциированными с одним и тем же событием.

#### Ассоциация инфразвуковых фаз

Будем рассматривать наборы фаз, отобранные из всего потока, как описано в предыдущем пункте.

Модуль ASIS ассоциирует сигналы в круге, центр и радиус которого задаются в конфигурационном файле параметрами  $\varphi_0$  (широта центра),  $\lambda_0$  (долгота центра) и  $R_1$  (радиус области поиска). При этом область разбивается на перекрывающиеся круговые ячейки радиуса  $R_0$ , для каждой из которых проверяется гипотеза, не произошло ли в данной ячейке инфразвуковое событие. Дополнительными параметрами ассоциации являются допустимое отклонение азимута  $\Delta\alpha$  и порог  $T_0$ .

Дальше будем обозначать ( $k$ -индекс ячейки,  $i$ -индекс станции,  $j$ -индекс события):  $(\varphi_0, \lambda_0)$  – координаты центра области поиска;  $(\varphi_k, \lambda_k)$  – координаты центра  $k$ -й ячейки;  $R_0$  – радиус ячейки сетки;  $R_1$  – радиус области поиска;  $c_0$  – минимальная скорость пробега инфразвуковой волны;  $c_1$  – максимальная скорость пробега инфразвуковой волны;  $\Delta\alpha$  – допустимое отклонение азимута;  $[t_{0ij}, t_{1ij}]$  – интервал времени, в котором на  $i$ -й станции обнаружено  $j$ -е событие;  $\alpha_{ij}$  – азимут из  $i$ -й станции на  $j$ -е событие;  $\beta_{ik}$  – азимут из  $i$ -й станции на центр  $k$ -й ячейки;  $\Delta\beta_{ik}$  – максимальное расхождение между  $\beta_{ik}$  и азимутом из  $i$ -й станции на край  $k$ -й ячейки;  $d_{ik}$  – расстояние от  $i$ -й станции до  $k$ -й ячейки.

В первых версиях алгоритма  $c_0$  и  $c_1$  были постоянными. В последних версиях это медленно меняющиеся функции, зависящие от расстояния от станции до события.

Ассоциация инфразвуковых сигналов, зарегистрированных на разных станциях, производится методом, идейно близким к Generalized Beamforming [Ringdal and Kværna, 1989]. Вычисляется рейтинг для ячейки  $k$ , то есть оценка предположения, что источник инфразвукового события находился в этой ячейке.

Просматриваются все сигналы ( $j$ ) всех станций ( $i$ ). Для каждого сигнала  $ij$  вычисляем вес того, что он произведен событием, случившимся в ячейке  $k$ :

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & |\alpha_{ij} - \beta_{ik}| \leq \Delta\beta_{ik} \\ 1 - \frac{|\alpha_{ij} - \beta_{ik}| - \Delta\beta_{ik}}{\Delta\alpha}, & \Delta\beta_{ik} < |\alpha_{ij} - \beta_{ik}| < \Delta\beta_{ik} + \Delta\alpha. \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

Другими словами, этот вес равен 1, если азимут на источник сигнала пересекает ячейку, меньше 1, если проходит рядом с ячейкой, и равен 0, если далек от ячейки.

Для сигналов с  $w_{ij} > 0$  вычислим интервал времен, в который могло бы произойти событие, если оно случилось в ячейке  $k$ :

$$\left[ t_{0ij} - \frac{d_{ik} + R_1}{c_0}, t_{1ij} - \frac{d_{ik} - R_1}{c_1} \right].$$

Характеристическую функцию сигнала  $w_{ij}$  определим, как:

$$f_{ij}(t) = \begin{cases} w_{ij}, & t \in \left[ t_{0ij} - \frac{d_{ik} + R_1}{c_0}, t_{1ij} - \frac{d_{ik} - R_1}{c_1} \right] \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}.$$

Характеристическую функцию станции  $i$  определим, как максимум по всем сигналам, зарегистрированным этой станцией:

$$F_i(t) = \max_j f_{ij}(t).$$

Окончательно, рейтинг рассматриваемой ячейки  $R$  определяем, как:

$$R = \max_t \sum_i F_i(t).$$

Другими словами, рейтинг ячейки меньше или равен максимальному числу сигналов, зарегистрированных разными станциями (по одному на станцию), которые одновременно могут быть проассоциированы с данной ячейкой. Если рейтинг больше порога  $T_0$ , сигналы, внесшие ненулевой вклад в рейтинг, считаются ассоциированными. За предварительную оценку координат берется центр ячейки. Ассоциированные сигналы изымаются из списка, и процедура ассоциации повторяется снова.

**Уточнение локации ассоциированных фаз, оценка эллипса ошибок**

На вход процедуры уточнения локации поступает информация о станциях, на которых обнаружен приход волны, для каждой станции – набор подходящих азимутов, ошибки их определения и веса (здесь веса – единицы или числа, немного их меньше, если азимут фазы попал не точно в ячейку, а отклонился от нее на угол, не превышающий  $\Delta\alpha$ ).

Введем обозначения:  $N$  – число станций, для которых есть приходы. Индекс станции –  $i$ . Для каждой  $i$ -й станции:  $(\varphi_i, \lambda_i)$  – координаты станции,  $N_{азим, i}$  – число азимутов у  $i$ -й станции (индекс  $j$ ). Для каждого  $j$ -го азимута  $i$ -й станции:  $\alpha_{ij}$  –  $j$ -й азимут  $i$ -й станции,  $\varepsilon_{ij}$  – неустранимая ошибка определения  $j$ -го азимута,  $w_{ij}$  – вес  $j$ -го азимута.

Введем функцию невязки по расстоянию в зависимости от предполагаемых координат события  $Err(\varphi, \lambda)$ :

$$Err(\varphi, \lambda) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{станций}} \text{Dist}(\varphi_i, \lambda_i, \varphi, \lambda) w_{i, \min} \min_j \left( \left\| Az(\varphi_i, \lambda_i, \varphi, \lambda), \alpha_{ij} \right\| + \varepsilon_{ij} \right)}{\sum_{i=1}^{N_{станций}} w_{i, \min}}.$$



Здесь  $\text{Dist}(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2)$  – расстояние между двумя точками по поверхности Земли;  $\text{Az}(\varphi_1, \lambda_1, \varphi_2, \lambda_2)$  – азимут из точки 1 в точку 2;  $\|\alpha_1, \alpha_2\|$  – угловая разность между азимутами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  ( $0^\circ$ – $180^\circ$ ).

Под  $w_{i,\min}$  понимается вес  $w_{i,j}$  для того  $j$ , на котором достигается указанный в формуле минимум.

Функция  $\text{Err}(\varphi, \lambda)$  минимизируется по координатам, за исходную точку минимизации берется центр круговой ячейки, для которой была произведена ассоциация.

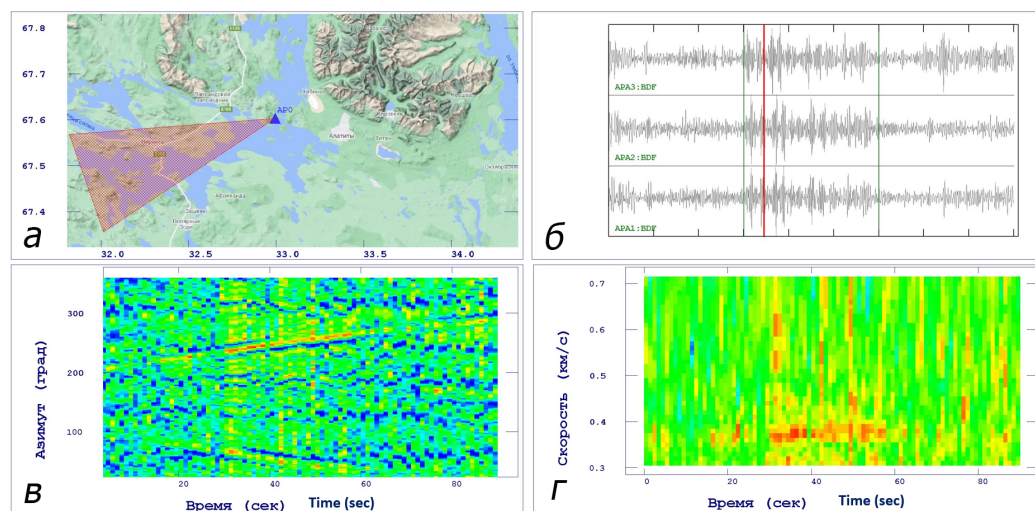
По окончании локации рассчитывается эллипс ошибок. Он строится следующим образом. В точке, куда пришел алгоритм локации, считаются производные функции  $\text{Err}$  по всем направлениям. Направление, в котором эта производная достигает максимума, принимается за азимут большой полуоси. Длина малой полуоси принимается равной

$$\text{Err}(\varphi, \lambda), \text{ а большой – } \text{Err}(\varphi, \lambda) \frac{\max_{\alpha} \frac{\partial \text{Err}}{\partial \alpha}}{\min_{\alpha} \frac{\partial \text{Err}}{\partial \alpha}}.$$

### Представление результатов

По результатам детектирования и локации инфразвуковых событий программа PSDL создает бюллетени обнаруженных событий в формате HTML. Отдельные бюллетени могут быть сгенерированы для событий, обнаруженных отдельными группами (модули QACD), а также ассоциированные по нескольким группам (модуль ASIS). Бюллетени содержат информацию о событии (азимуты, координаты, ошибки локации и т.д.), а также карты, на которые нанесены события, азимуты приходов волн, эллипсы ошибок локации и т.д.

Кроме бюллетеней, система создает файлы с фрагментами волновых форм событий в формате CSS 3.0, к которым прикрепляется база данных с метаинформацией о событиях. Эта база позволяет выполнять поиск, генерировать таблицы и отчеты, рассчитывать статистические характеристики наборов событий с помощью программы интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых данных LOS [Асминг и др., 2021].



**Рис. 3.** Пример изображений, генерируемых при создании бюллетеня событий, зарегистрированных по одиночной группе АРО: а – карта, отображающая положение группы и сектор, покрывающий диапазон азимутов, с которых был принят сигнал; б – запись сигнала тремя каналами группы АРО, выделен фрагмент, соответствующий событию; в – кросскорреляционный график, отображающий изменение азимута сигнала со временем; г – кросскорреляционный график, отображающий изменение кажущейся скорости подхода волны со временем.

На рис. 3 показан пример бюллетеня, созданного для события, порожденного движущимся объектом (с большой вероятностью пролетом самолета). Азимут источника сигнала плавно менялся со временем.

### Заключение

В работе подробно описаны алгоритмы обнаружения, ассоциации инфразвуковых сигналов, а также локации их источников по данным нескольких инфразвуковых групп. Описанные алгоритмы реализованы в программном комплексе PSDL. Опыт применения данного программного комплекса в задачах мониторинга инфразвуковых сигналов в Арктической зоне Российской Федерации (АЗРФ) показал высокую эффективность. В частности, программа PSDL применялась для обнаружения инфразвуковых сигналов, генерируемых движением снежной массы при сходе лавин в Хибинском горном массиве в Мурманской области. Специфическими особенностями таких сигналов являются длительность сигнала более 10 сек (до 40 сек в условиях Хибин) и изменчивость азимута на источник, в результате движения, генерирующего сигнал, фронта лавины по склону. Реализованный в программе алгоритм анализа протяженных сигналов, объединяющий соседние по времени фрагменты в общий сигнал, учитывает логику изменения азимута на источник и позволяет уверенно обнаруживать и классифицировать такого рода сигналы. Реализованный в программном комплексе алгоритм ассоциации инфразвуковых сигналов с результатами сейсмических наблюдений в случае совместной сейсмоинфразвуковой регистрации позволяет уточнять локализацию источников сигналов по данным одиночной сейсмоинфразвуковой группы. Также наличие или отсутствие ассоциируемого с инфразвуковым сигналом сейсмического может служить дополнительным критерием для классификации природы его источника.



**Благодарности.** Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-20007, <https://rscf.ru/project/24-27-20007/>.

### Список литературы

- Асминг В. Э. и Асминг С. В. Поточная система автоматического детектирования, локации и дискриминации PSDL // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XVI Международной сейсмологической школы. — Обнинск : ФИЦ ЕГС РАН, 2022. — С. 17. — EDN: MNHNFK.
- Асминг В. Э., Баранов С. В., Виноградов А. Н. и др. Использование инфразвукового метода для мониторинга деструкции ледников в арктических условиях // Акустический журнал. — 2016. — Т. 62, № 5. — С. 582–591. — DOI: [10.7868/S0320791916040031](https://doi.org/10.7868/S0320791916040031).
- Асминг В. Э., Федоров А. В. и Прокудина А. В. Программа для интерактивной обработки сейсмических и инфразвуковых записей LOS // Российский сейсмологический журнал. — 2021. — Т. 3, № 1. — С. 27–40. — DOI: [10.35540/2686-7907.2021.1.02](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.02).
- Виноградов Ю. А., Федоров А. В., Баранов С. В. и др. О выделении айсбергообразующих льдотрясений по сейсмоинфразвуковым данным // Лёд и снег. — 2021. — Т. 61, № 2. — С. 262–270. — DOI: [10.31857/S2076673421020087](https://doi.org/10.31857/S2076673421020087).
- Arrowsmith S. J., Hedlin M. A. H., Stump B., *et al.* Infrasonic Signals from Large Mining Explosions // Bulletin of the Seismological Society of America. — 2008. — Vol. 98, no. 2. — P. 768–777. — DOI: [10.1785/0120060241](https://doi.org/10.1785/0120060241).
- Cansi Y. and Le Pichon A. Infrasound Event Detection Using the Progressive Multi-Channel Correlation Algorithm // Handbook of Signal Processing in Acoustics. — Springer New York, 2008. — P. 1425–1435. — DOI: [10.1007/978-0-387-30441-0\\_77](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30441-0_77).
- Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N., *et al.* Infrasound production by bolides: A global statistical study // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. — 2012. — Vol. 80. — P. 208–229. — DOI: [10.1016/j.jastp.2012.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.01.018).
- Gibbons S. J., Asming V., Eliasson L., *et al.* The European Arctic: A Laboratory for Seismoacoustic Studies // Seismological Research Letters. — 2015. — Vol. 86, no. 3. — P. 917–928. — DOI: [10.1785/0220140230](https://doi.org/10.1785/0220140230).
- Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies: Challenges in Middle Atmosphere Dynamics and Societal Benefits / ed. by A. Le Pichon, E. Blanc and A. Hauchecorne. — Springer International Publishing, 2019. — DOI: [10.1007/978-3-319-75140-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5).
- Koch K. and Pilger Ch. Infrasound observations from the site of past underground nuclear explosions in North Korea // Geophysical Journal International. — 2018. — Vol. 216, no. 1. — P. 182–200. — DOI: [10.1093/gji/ggy381](https://doi.org/10.1093/gji/ggy381).
- Le Pichon A., Blanc E., Drob D., *et al.* Infrasound monitoring of volcanoes to probe high-altitude winds // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2005. — Vol. 110, no. D13. — DOI: [10.1029/2004JD005587](https://doi.org/10.1029/2004JD005587).

- Liszka L. *and* Waldemark K. High Resolution Observations of Infrasound Generated by the Supersonic Flights of Concorde // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. — 1995. — Vol. 14, no. 4. — P. 181–192. — DOI: [10.1177/026309239501400403](https://doi.org/10.1177/026309239501400403).
- Mutschlecner J. P. *and* Whitaker R. W. Infrasound from earthquakes // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2005. — Vol. 110, no. D1. — DOI: [10.1029/2004JD005067](https://doi.org/10.1029/2004JD005067).
- Ringdal F. *and* Kværna T. A multi-channel processing approach to real time network detection, phase association, and threshold monitoring // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1989. — Vol. 79, no. 6. — P. 1927–1940. — DOI: [10.1785/BSSA0790061927](https://doi.org/10.1785/BSSA0790061927).

# ALGORITHMS FOR AUTOMATIC DETECTION AND LOCATION OF INFRASOUND EVENTS IN THE PSDL SYSTEM

V. E. Asming<sup>1</sup>  and A. V. Fedorov<sup>\*\*1</sup> 

<sup>1</sup>Kola branch of Geophysical survey of Russia Academy of Sciences, Apatity, Russia

**\*\*Correspondence to:** Andrey Fedorov, Afedorov@krsc.ru

The paper presents a description of an automated system and the algorithms implemented in it for detection, association and location of low-frequency acoustic events based on infrasound array data. An algorithm for detecting infrasound signals by calculating the cross-correlation function between records of individual sensors in a array is described. The implemented algorithm is optimized for working with arrays consisting of a large number of sensors, which allows minimizing the computational load on the monitoring system in near-real time mode. A procedure for recognizing long-term signals with a source position that may change over time, such as moving vehicles or snow avalanches, is described. The paper also describes algorithms for associating infrasound signals recorded by different arrays, as well as locating a signal source based on data from several infrasound arrays. The system is capable of simultaneously analyzing seismic and infrasound monitoring data and detecting pairs of two types of signals associated with a common source. The algorithm for such an association is also given in the paper. The described system of automatic detection and location of infrasound signals can be used for monitoring dangerous natural and man-made processes and phenomena in a mode close to real time.

**Keywords:** infrasound signal, infrasound array, detection, location, cross-correlation.

**Citation:** Asming V. E., A. V. Fedorov (2024), Algorithms for Automatic Detection and Location of Infrasound Events in the PSDL System, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES6002, <https://doi.org/10.2205/2024ES000944>, EDN: ZVUUJP

Received: 4 October 2024  
Accepted: 23 October 2024  
Published: 30 December 2024



© 2024. The Authors.

## References

- Arrowsmith S. J., Hedlin M. A. H., Stump B., *et al.* Infrasonic Signals from Large Mining Explosions // *Bulletin of the Seismological Society of America*. — 2008. — Vol. 98, no. 2. — P. 768–777. — DOI: [10.1785/0120060241](https://doi.org/10.1785/0120060241).
- Asming V. E. *and* Asming S. V. The stream system of automatic detection, location and discrimination PSDL // *Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XVI International Seismological Workshop*. — Obninsk : GS RAS, 2022. — P. 17. — EDN: MNHNFK.
- Asming V. E., Baranov S. V., Vinogradov A. N., *et al.* Using an infrasonic method to monitor the destruction of glaciers in Arctic conditions // *Acoustical Physics*. — 2016. — Vol. 62, no. 5. — P. 583–592. — DOI: [10.1134/S1063771016040035](https://doi.org/10.1134/S1063771016040035).
- Asming V. E., Fedorov A. *and* Prokudina A. The program LOS for interactive seismic and infrasonic data processing // *Russian Journal of Seismology*. — 2021. — Vol. 3, no. 1. — P. 27–40. — DOI: [10.35540/2686-7907.2021.1.02](https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.1.02).
- Cansi Y. *and* Le Pichon A. Infrasound Event Detection Using the Progressive Multi-Channel Correlation Algorithm // *Handbook of Signal Processing in Acoustics*. — Springer New York, 2008. — P. 1425–1435. — DOI: [10.1007/978-0-387-30441-0\\_77](https://doi.org/10.1007/978-0-387-30441-0_77).
- Ens T. A., Brown P. G., Edwards W. N., *et al.* Infrasound production by bolides: A global statistical study // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. — 2012. — Vol. 80. — P. 208–229. — DOI: [10.1016/j.jastp.2012.01.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.01.018).
- Gibbons S. J., Asming V., Eliasson L., *et al.* The European Arctic: A Laboratory for Seismoacoustic Studies // *Seismological Research Letters*. — 2015. — Vol. 86, no. 3. — P. 917–928. — DOI: [10.1785/0220140230](https://doi.org/10.1785/0220140230).
- Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies: Challenges in Middle Atmosphere Dynamics and Societal Benefits / ed. by A. Le Pichon, E. Blanc *and* A. Hauchecorne. — Springer International Publishing, 2019. — DOI: [10.1007/978-3-319-75140-5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5).

- Koch K. *and* Pilger Ch. Infrasound observations from the site of past underground nuclear explosions in North Korea // Geophysical Journal International. — 2018. — Vol. 216, no. 1. — P. 182–200. — DOI: [10.1093/gji/ggy381](https://doi.org/10.1093/gji/ggy381).
- Le Pichon A., Blanc E., Drob D., *et al.* Infrasound monitoring of volcanoes to probe high-altitude winds // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2005. — Vol. 110, no. D13. — DOI: [10.1029/2004JD005587](https://doi.org/10.1029/2004JD005587).
- Liszka L. *and* Waldemark K. High Resolution Observations of Infrasound Generated by the Supersonic Flights of Concorde // Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. — 1995. — Vol. 14, no. 4. — P. 181–192. — DOI: [10.1177/026309239501400403](https://doi.org/10.1177/026309239501400403).
- Mutschlecner J. P. *and* Whitaker R. W. Infrasound from earthquakes // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. — 2005. — Vol. 110, no. D1. — DOI: [10.1029/2004JD005067](https://doi.org/10.1029/2004JD005067).
- Ringdal F. *and* Kväerna T. A multi-channel processing approach to real time network detection, phase association, and threshold monitoring // Bulletin of the Seismological Society of America. — 1989. — Vol. 79, no. 6. — P. 1927–1940. — DOI: [10.1785/BSSA0790061927](https://doi.org/10.1785/BSSA0790061927).
- Vinogradov Yu. A., Fedorov A. V., Baranov S. V., *et al.* Identification of iceberg-forming ice quakes from seismic and infrasound data // Ice and Snow. — 2021. — Vol. 61, no. 2. — P. 262–270. — DOI: [10.31857/S2076673421020087](https://doi.org/10.31857/S2076673421020087).