

УДК 534.6

БЫСТРЫЙ ДЕТЕКТОР ИНФРАЗВУКОВЫХ СОБЫТИЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

© 2021 г. В.Э. Асминг¹, А.В. Федоров¹, Ю.А. Виноградов²,
Д.В. Чебров³, С.В. Баранов¹, И.С. Федоров¹

¹ Кольский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, г. Апатиты, Россия

² Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, г. Обнинск, Россия

³ Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”, г. Петропавловск-Камчатский, Россия
Автор для переписки: А.В. Федоров (e-mail: AFedorov@krsc.ru)

Предлагаемая статья посвящена развитию методов и алгоритмов автоматического обнаружения полезных сигналов в зашумленной среде на записях инфразвуковых групп. Приведен обзор наиболее распространенных методов обработки инфразвуковых сигналов. Описан набор алгоритмов и последовательность их применения для быстрого определения инфразвуковых сигналов на записях инфразвуковой группы, реализованные в виде автоматического детектора. Быстродействие представленного детектора достигается за счет оптимизации вычислений и предварительного расчета части параметров для инфразвуковых групп, состоящих из трех датчиков. Актуальность применения быстрых алгоритмов обнаружения целевых сигналов продиктована рядом прикладных задач по оперативному выявлению мест генерации инфразвуковых сигналов, например при поиске отработавших элементов ракет-носителей или контроле лавиноопасных склонов в горной местности. Рассмотренный в статье автоматический детектор производит оценку ряда стандартных параметров обнаруженных акустических сигналов, таких как азимут на источник, угол падения волны, кажущаяся скорость. Дополнительно реализованы алгоритмы оценки длительности зарегистрированных сигналов и изменчивости азимута на источник. Последние два параметра применяются для автоматического выявления движущихся источников инфразвуковой эмиссии. Обработка применения описываемого детектора в режиме, близком к реальному времени, осуществлена в рамках экспериментальных работ по инфразвуковому мониторингу лавинной активности на полуострове Камчатка в феврале–апреле 2020 г. Результаты применения детектора показали высокую достоверность получаемых решений. Автоматически обнаруженные и ассоциированные с лавинными проявлениями сигналы были верифицированы визуальным осмотром местности.

Ключевые слова: детектирование, инфразвук, источники инфразвуковых сигналов, инфразвуковой мониторинг, снежные лавины.

Введение

Многие природные и антропогенные явления генерируют акустические и инфразвуковые сигналы. К природным источникам инфразвука можно отнести извержения вулканов, сильные землетрясения, штормы, процессы деструкции ледников [Виноградов и др., 2014], снежные лавины [Федоров, Федоров, Воронин, 2018; Marchetti et al., 2015], процессы распада метеоритов в атмосфере [Евтюгина, Асминг, 2018; Brown et al., 2002; Pilger et al., 2019] и др. Техногенными источниками инфразвука являются взрывы, пролеты самолетов и ракет, движение наземного транспорта и работа технологического оборудования. При этом инфразвуковые волны могут распространяться

на большие расстояния [Воробьев и др., 1986] и регистрироваться чувствительной аппаратурой – микробарографами либо низкочастотными микрофонами (датчиками).

Для регистрации инфразвуковых сигналов используются наборы разнесенных в пространстве однотипных датчиков – группы, конфигурации которых могут быть разнообразны; расстояния между датчиками в них варьируют от сотен метров до нескольких километров [Gibbons et al., 2015].

Активное развитие систем инфразвукового мониторинга началось в связи с работами по верификации режима соблюдения Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний (ДВЗЯИ). Инфразвуковая волна, порожденная ядерным взрывом способна несколько раз обогнуть земной шар, что позволяет эффективно контролировать факты ядерных испытаний. В настоящее время инфразвуковая часть Международной системы мониторинга ДВЗЯИ насчитывает 60 групп [Gibbons et al., 2015].

Наряду с инфразвуковыми группами, работающими в рамках ДВЗЯИ, создаются и другие инфразвуковые группы для решения фундаментальных и прикладных научных задач. Так, например, в 2003 г. в окрестностях г. Апатиты Мурманской области Кольским филиалом Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук” (ФИЦ ЕГС РАН) была установлена группа из трех микробарографов, расположенных совместно с некоторыми элементами малоапертурной сейсмической группы. Установка получила название сейсмоинфразвуковой комплекс “Апатиты” [Виноградов, 2004].

Для автоматизации процесса обработки данных получаемых инфразвуковой группой были разработаны специальные алгоритмы обнаружения инфразвуковых событий.

Обзор методов инфразвуковых сигналов

В основе детектирования акустических сигналов зарегистрированных группами разнесенных датчиков лежит представление инфразвукового сигнала в виде плоской волны. Поскольку длина инфразвуковой волны (десятки–сотни метров) сопоставима с расстояниями между элементами инфразвуковой группы, то сигнал на разных сенсорах является идентичным с точностью до временных задержек прихода волны на датчики группы. В то же время фоновый шум в силу своей стохастической природы варьирует от датчика к датчику. Таким образом, выявление инфразвуковых событий заключается в определении фрагментов идентичных сигналов на записях разных каналов инфразвуковой группы.

Одним из первых предложенных методов обнаружения сигналов по данным инфразвуковых групп является детектор, основанный на частотно-волновом анализе (F - K анализ) и использовании F -статистики. Изначально этот метод возник в сейсмологии для выявления сигналов от сейсмических событий [Burg, 1964] и впоследствии был адаптирован для детектирования инфразвуковых сигналов [Smart, Flinn, 1971]. Суть метода заключается в вычислении взаимного спектра каналов, зависящего от задержек прихода волны на датчики группы и волнового вектора, в движущемся временном окне. Временные задержки и волновой вектор определяются с помощью F - K анализа, который заключается в максимизации модуля взаимного корреляционного спектра [Smart, Flinn, 1971]. Затем каждый обнаруженный локальный максимум, проверяется на соответствие инфразвуковому сигналу с помощью F -детектора [Melton, Bailey, 1957]. В этих целях используется F -статистика, которая во временной области имеет вид [Shumway, 1971; Smart, Flinn, 1971]:

$$F = \frac{J-1}{J} \frac{\sum_{n=n_0}^{n_0+W-1} \left[\sum_{j=1}^J x_j(n + \Delta t_j) \right]^2}{\sum_{n=n_0}^{n_0+W-1} \left[\sum_{j=1}^J \left\{ x_j(n + \Delta t_j) - \frac{1}{J} \sum_{m=1}^J x_m(n + \Delta t_m) \right\}^2 \right]}. \quad (1)$$

Здесь J – число датчиков в группе; n_0 – номер начального отсчета анализируемого сигнала; W – ширина временного окна в отчетах; $x_j(n)$ – амплитуда n -го отсчета на j -м датчике; Δt_j – временная задержка прихода сигнала на j -й датчик.

Выражение (1) записано при условии, что каждый канал группы имеет нулевое среднее.

Фактически, F -статистика (1) в общем виде представляет отношение сигнал/шум. Действительно, числитель в (1) – это энергия зарегистрированного группой сигнала с учетом временных задержек, а знаменатель представляет собой сумму квадратов разностей амплитуд каждого канала и сформированного луча (*beam*), что является оценкой энергии некоррелированного шума. Когда временное окно набегаёт на сигнал, значение F -статистики возрастает, поскольку энергия сигнала в числителе увеличивается и знаменатель на коррелированном сигнале уменьшается до остаточного шума [Blandford, 1974]. Отметим, что чем больше датчиков в группе, тем точнее F -статистика оценивает отношение сигнал/шум.

Рассматриваемый метод позволяет обнаруживать сигналы в условиях постоянно меняющегося уровня шума при условии, что внутри текущего временного окна уровень шума постоянен. Определённым ограничением данного метода для успешного применения является необходимость использования большого числа датчиков в группе, чтобы повысить достоверность результатов, что увеличивает сложность вычислений, а, следовательно, и время получения результата. Кроме того, при наличии коррелированного шума, этот метод даёт много ложных срабатываний, принимая шум за сигнал.

Большое распространение для детектирования инфразвуковых сигналов получил алгоритм *PMCC* (*Progressive Multichannel Correlation*), в основном благодаря применению в системах мониторинга в рамках ДВЗЯИ [Cansi, 1995; Cansi, Pichon, 2008]. Идея алгоритма *PMCC* заключается в использовании для вычисления временных задержек прихода волны на датчики взаимной корреляционной функции (кросс-корреляции) каналов и анализа согласованности сигналов на разных датчиках. Вначале кросс-корреляция рассчитывается для троек каналов, в случае превышения некоторого порога на какой-либо тройке к ней последовательно добавляются остальные каналы.

На первом шаге алгоритма *PMCC* определяются временные задержки с помощью максимизации корреляционной функции. Вычисления проводятся в окне, длина которого W должна быть больше максимального времени пробега звуковой волны между любыми датчиками в пределах группы.

На втором шаге выполняется проверка условия, что модуль суммы всех задержек меньше некоторого заранее выбранного порога согласованности

$$\left| \sum \Delta t_j \right| < h, \quad (2)$$

где h – заранее выбранный порог согласованности, больший, чем период дискретизации сигнала.

Инфразвуковой сигнал считается обнаруженным, если выполнено условие (2).

На третьем шаге алгоритма для участка записи, на котором выполнено условие (2), для выделенного сигнала определяются азимут на источник α и угол наклона к дневной поверхности β (угол тангажа) с помощью системы уравнений

$$\Delta t_j = (\Delta X_j \cos \alpha + \Delta Y_j \sin \alpha) \cos \beta / V, \quad j=1, \dots, J, \quad (3)$$

в которой j – номер датчика; V – скорость звука; ΔX_j и ΔY_j – координаты датчиков в прямоугольной декартовой системе.

В Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН ранее был разработан и реализован алгоритм детектирования, основанный на методе “*beamforming*”, заимствованном в методике обработки данных сейсмических групп, то есть на суммировании записей отдельных датчиков со сдвигами, которые зависят от предполагаемых азимута на источник и кажущейся скорости прихода сигнала [Асминг и др., 2008, 2009]. Данный алгоритм, как и описанные выше, является универсальным в том смысле, что может быть использован для инфразвуковых групп с любым количеством и расстановкой датчиков.

В 2009 г. в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН начаты работы по созданию мобильных инфразвуковых групп, которые впоследствии были применены для инфразвуковой локализации мест падений фрагментов ракет-носителей, возвращающихся в плотные слои атмосферы, а также временных наблюдений в рамках фундаментальных работ [Асминг и др., 2016; Карпинский, Асминг, 2020]. Под мобильностью здесь понимается то, что эти группы, обеспечиваемые питанием от аккумуляторных батарей, состоящие из трех низкочастотных микрофонов свободного поля, систем сбора и передачи данных, могут быть оперативно доставлены в нужное место и развернуты в короткие сроки для проведения временных измерений. Число микрофонов выбиралось из соображений минимальной достаточности. Такая конфигурация является минимально необходимой для идентификации целевого сигнала и определения параметров прихода волны: азимута на источник, кажущейся скорости и угла падения.

Необходимость оперативной, близкой к реальному времени, обработки данных, собираемых мобильными инфразвуковыми группами, поставила задачу создания быстрого автоматического акустического детектора. Еще большую актуальность задача оперативной и высокодостоверной обработки данных инфразвуковых групп получила в рамках начатых в 2018 г. Кольским филиалом ФИЦ ЕГС РАН работ по созданию комплекса инфразвукового контроля лавинной активности, нацеленного на оперативное оповещение о факте схода снежной массы.

Идея ускорения процесса детектирования инфразвуковых сигналов заключается в техническом решении применять инфразвуковые группы, состоящие только из трех датчиков, что дает возможность построить более простой, чем упомянутые выше, быстро и эффективно работающий алгоритм детектирования. Такой алгоритм был реализован в Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН в виде программы *QACD* (*quick acoustic detector*), которая может обнаруживать инфразвуковые события, оценивать длительность когерентных сигналов и изменение азимута источника сигнала со временем, если объект движется. По изменению азимута со временем можно распознавать и выделять на записях сигналы, вызванные сходом снежных лавин, описание регистрации которых будет рассмотрено в данной статье в качестве примера применения автоматического детектора.

Реализованный алгоритм детектора

В целях оптимизации вычислительных процессов во время работы программа *QACD* при запуске производит подготовительный расчет. Для набора возможных азимутов прихода волны от 0 до 360° с шагом в 1° и углов падения от 0 до 70° с шагом 10° (всего 2880 вариантов) определяются временные сдвиги сигнала на втором и третьем каналах относительно первого канала в отсчетах (ΔN_{21} и ΔN_{31}) с учетом заданных координат датчиков по следующим формулам:

$$\Delta N_{21} = \text{Int} \left(\frac{\cos \theta ((x_2 - x_1) \cos \alpha + (y_2 - y_1) \sin \alpha)}{V \cdot h} \right), \quad (4)$$

$$\Delta N_{31} = \text{Int} \left(\frac{\cos \theta ((x_3 - x_1) \cos \alpha + (y_3 - y_1) \sin \alpha)}{V \cdot h} \right), \quad (5)$$

в которых α – азимут на источник; θ – угол подхода к дневной поверхности (угол падения); h – шаг дискретизации; $\text{Int}()$ – операция округления до целых.

Если ΔN_{21} и ΔN_{31} для какой-либо пары (α, θ) совпадают с вычисленными ранее, они игнорируются. Все остальные случаи запоминаются, создается массив из набора четверок $(\alpha, \theta, \Delta N_{21}, \Delta N_{31})$. Как правило, число этих четверок меньше, чем 2880, потому что существенная часть определенных пар сдвигов совпадает (это зависит от шага дискретизации и расположения датчиков).

В процессе работы программы *QACD* записи инфразвуковых групп анализируются временными окнами, длину которых задает пользователь. Стандартная длина составляет 600 с.

Вначале просмотра каждого фрагмента данных производится поиск мест в записи, на которых амплитуда возможного сигнала превышает амплитуду шума. Для этого фрагмент данных разбивается на короткие (стандартная длина – 3 с) участки, и в каждом из них рассчитывается средняя амплитуда, причем усреднение ведется по всем отсчетам всех трех каналов. Таким образом, для фрагмента длиной 600 с и трехсекундного окна получается набор амплитуд $A_i, i=1, \dots, 200$.

В этом наборе статистически оценивается уровень шума (выбирается одна третья часть наименьших амплитуд, по ним считается среднее). Обозначим оцененный таким образом уровень шума как N . Далее вычисляются отношения сигнал/шум для всех участков сигнала:

$$SNR_i = A_i / N. \quad (6)$$

Для всех таких коротких участков проверяется превышение сигнала над шумом. Пороговое значение отношения сигнал/шум ($SNR_{\text{порог}}$) задается пользователем. Считается, что на i -м участке записи может содержаться инфразвуковое событие, если выполняется условие $SNR_{i+k} > SNR_{\text{порог}}$, $k = \{-1, 0, 1\}$.

Далее, на найденных таким образом участках-претендентах определяются когерентные сигналы. Для этого перебираются построенные в начале работы детектора четверки $(\alpha, \theta, \Delta N_{21}, \Delta N_{31})$. Для каждой четверки рассчитывается параметр когерентности

$$C = \frac{1}{3} \cdot (Corr_{12} + Corr_{13} + Corr_{23}). \quad (7)$$

Здесь $Corr_{ij}$ – коэффициент корреляции между участками записи каналов i и j , каждый из которых сдвинут на ΔN отсчетов, где ΔN соответствует проверяемой четверке.

Также вычисляется параметр “Gain” – G , имеющий смысл максимального амплитудного приращения при сложении каналов с данными временными сдвигами.

Для каждой пары C и G , которые оказались выше соответствующих порогов, рассчитывается рейтинг $R = SNR \cdot C \cdot G$, и параметры той четверки, на которой R достиг максимума, принимаются за азимут и угол подхода волны к дневной поверхности.

Таким образом, для каждого короткого (трехсекундного) участка записи определяется, найден ли в нем когерентный сигнал, и если да, то запоминаются его азимут и кажущаяся скорость. Однако инфразвуковые сигналы могут иметь сколь угодно большую длительность в зависимости от источника их генерации, при этом внутри одного длительного сигнала параметр когерентности может сильно варьировать. Для обнаружения

протяженных во времени сигналов необходимо ассоциировать близкие по времени участки когерентных сигналов с общим источником, т.е. объединять их в единый сигнал. Для решения этой задачи в рассматриваемом детекторе применяется следующее правило. Участки i и j объединяются, если

$$|t_i - t_j| < \Delta t_{\max}, \quad |\alpha_i - \alpha_j| < \Delta \alpha_{\max}. \quad (8)$$

Здесь Δt_{\max} и $\Delta \alpha_{\max}$ – максимальное расхождение по времени и по азимуту. Эти параметры и задаются пользователем в конфигурационном файле. Обычно их значения составляют 10 с для Δt_{\max} и 10° для $\Delta \alpha_{\max}$. 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 $\Delta \alpha_{\max}$, заданного пользователем для соседних рассматриваемых интервалов.

Представление результатов работы детектора

Результаты работы программы *QACD* сохраняются в виде набора взаимосвязанных файлов в формате *HTML* (бюллетени инфразвуковых событий), позволяющих легко реализовать к ним оперативный доступ всем заинтересованным потребителям через Интернет. При этом формируется отдельная база данных записей выявленных инфразвуковых событий в формате *CSS 3.0*.

Структура веб-бюллетеней следующая. Корневой файл *default.html* содержит ссылки на помесечные файлы – бюллетени в кратком формате (рис. 1). Они включают в себя общую карту, на которую нанесены азимуты на источник или сектора (для событий с изменяющимися со временем азимутами) всех выявленных событий, и краткую таблицу, содержащую для каждого события такие параметры как времена начала (*TBeg*) и конца (*TEnd*) обнаруженного сигнала, отношение сигнал/шум (*SNR*), *Gain*, когерентность (*COH*), кажущуюся скорость (*Vel*), диапазон азимутов (*Az0*, *Az1*) и длительность сигнала (*Duration*).

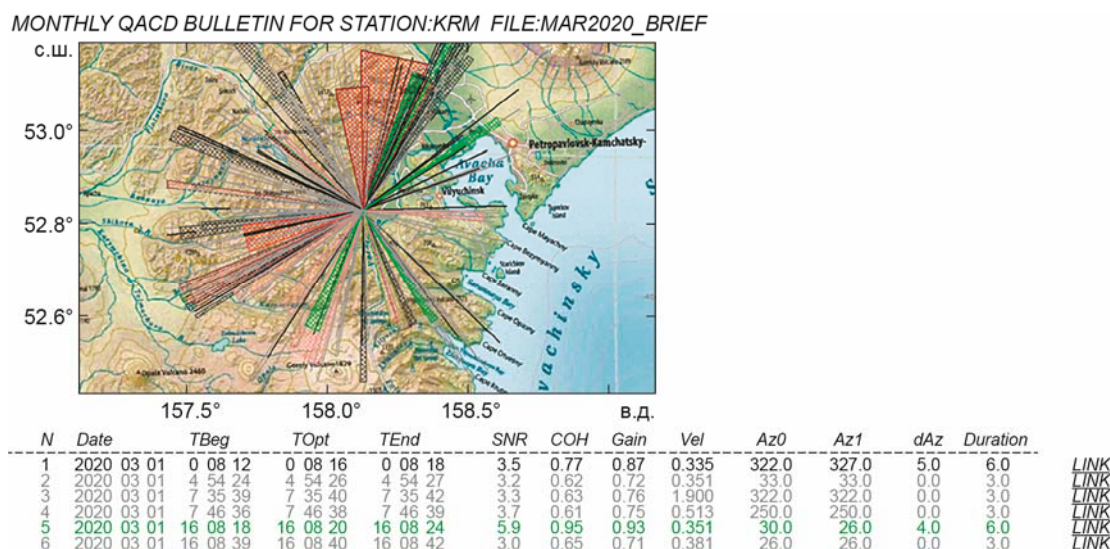


Рис. 1. Фрагмент краткого веб-бюллетеня, создаваемого программой *QACD* (комментарии см. в тексте)

Fig. 1. Fragment of a short Web bulletin produced by *QACD* program. Above: general map with plotted source azimuths or sectors of all detected events, below: summary table with the parameters of each event

Для упрощения анализа строки бюллетеня имеют следующий цветовой код: серый – слабые события ($4 > SNR > 3$) с невысокой когерентностью ($COH < 0.7$), черный – события с когерентностью больше 0.7, зеленый – сильные события ($SNR > 5$) с высокой когерентностью ($COH > 0.8$), красный – события с длительностью больше 20 с и изменением азимута на угол более десяти градусов. Аналогичный цветовой код используется при нанесении азимутов и секторов на общую карту (см. рис. 1).

Каждая строка краткого бюллетеня содержит ссылку на карточку с детальной информацией о данном событии – детальный бюллетень. В детальном бюллетене (рис. 2) для каждого события приводится карта с азимутом или сектором обратных азимутов, а также фрагмент записи, на котором помечены моменты начала и конца обнаруженного сигнала (вертикальные штриховые линии) и участок записи с максимальной когерентностью сигнала (вертикальная черная линия).

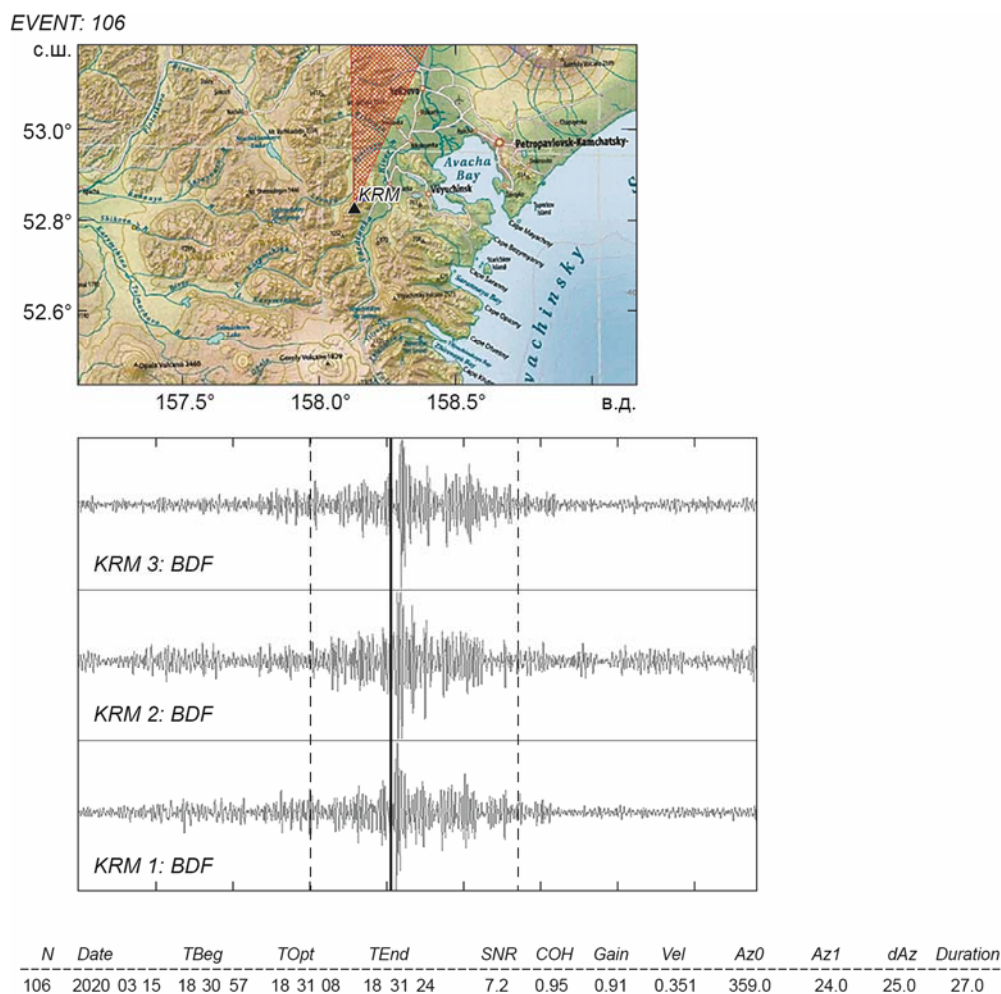


Рис. 2. Фрагмент детального веб-бюллетеня, созданного программой *QACD*, для инфразвукового события, зарегистрированного на станции Карымшин (*KRM*) 15.03.2020 г. *Вверху*: карта с сектором обратных азимутов, *внизу*: фрагмент записи, с отмеченными моментами начала и конца обнаруженного сигнала (вертикальные штриховые линии) и участок записи с максимальной когерентностью сигнала (вертикальная черная линия)

Рис. 2. Fragment of a detailed Web bulletin created by *QACD* program for an infrasonic event recorded at Karymshin station (*KRM*) on 15.03.2020. *Above*: a map with a sector of reverse azimuths, *below*: a fragment of a recording, with marked start and end points of the detected signal (vertical dashed lines) and a recording section with maximum signal coherence (vertical black line)

Опыт применения детектора

В феврале 2020 г. на полуострове Камчатка в гористой местности недалеко от с. Паратунка была установлена экспериментальная трехкомпонентная инфразвуковая группа на базе сейсмической станции Карымшин (*KRM*), входящей в региональную сеть сейсмического мониторинга Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН. Цель установки – проверка возможности обнаружения сигналов, порождаемых снежными лавинами во времени, близком к реальному. Инфразвуковая группа обеспечивалась каналом передачи данных по сети Интернет посредством сконфигурированного сервера, передающего данные по протоколу *LISS*. В Кольском филиале ФИЦ ЕГС РАН была сконфигурирована утилита, принимающая поток непрерывных данных и записывающая эти данные в кольцевой дисковый буфер. Поступающие данные обрабатывались программой *QACD*, в результате чего формировался доступный через Интернет веб-бюллетень.

В процессе работы системы с середины февраля по конец мая 2020 г. детектором выявлено большое количество инфразвуковых событий разных типов. В качестве претендентов на сигналы от снежных лавин рассматривались сигналы длительностью не менее 20 с преимущественно с азимутами, меняющимися по времени.

Запись одного такого события (15.03.2020 г., 18:30) и диапазон азимутов прихода сигнала от него приведены выше (см. рис. 2). Детальный анализ этого события выполнялся программой *BARPLOT*, которая позволяет считать кросс-корреляции между каналами со сдвигами, зависящими от предполагаемого азимута на событие и скорости подхода волн. Значения рассчитанной кросс-корреляции отображаются на графике оттенками цвета в поле азимут–время (скорость волны фиксируется), время отсчитывается от начала фрагмента в секундах. Яркие цвета соответствуют наилучшей корреляции в поле азимут–время (рис. 3).

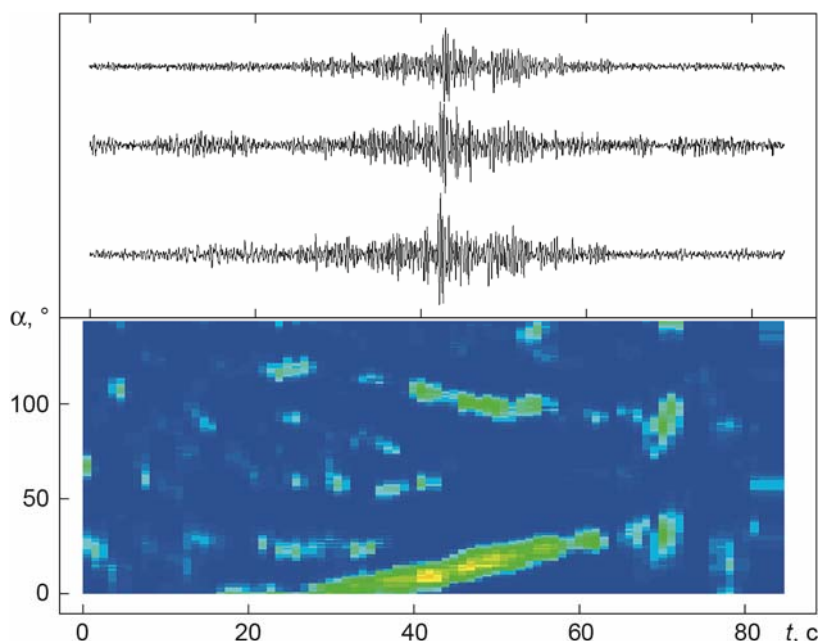


Рис. 3. Запись сигнала (*вверху*) и кросс-корреляционная диаграмма (*внизу*) инфразвукового события, зарегистрированного 15.03.2020 г. на станции Карымшин (*KRM*)

Рис. 3. Signal recording (*above*) and cross-correlation diagram (*below*) of the infrasonic event recorded on 15.03.2020 at the Karymshin station (*KRM*)

Анализируя рис. 3, можно видеть, что наилучшая оценка азимута плавно меняется от 0 до 26°. Это позволило предположить, что источник инфразвукового сигнала двигался. Событие 15.03.2020 г. было ассоциировано с вероятным сходом снежной лавины по двум критериям – длительности сигнала и изменчивости азимута на источник.

В целях проверки данного предположения сотрудники Камчатского филиала ФИЦ ЕГС РАН провели выезд на место предполагаемого схода лавины и обследовали его. В результате визуального наблюдения и съемки с беспилотного аппарата был подтвержден факт схода снежной лавины и получены оценки координат точки отрыва и точки выката, совпавшие с высокой точностью с оценками, полученными при обработке записей инфразвуковой группы программой *QACD*.

Всего за период временных наблюдений на полуострове Камчатка с марта по апрель 2020 г. выявлено семь инфразвуковых сигналов, которые по указанным выше критериям могли быть вызваны сходом снежных лавин. В четырех случаях связь обнаруженных сигналов с лавинной активностью была подтверждена прямыми наблюдениями, в остальных случаях визуальных подтверждений получить не удалось, так как лавинные очаги, в направлении которых указывал рассчитанный обратный азимут, находились в труднодоступной в весенний период местности.

Заключение

Возникновение мобильных комплексов инфразвукового мониторинга для решения прикладных задач, в частности определения мест падения отработанных фрагментов ракет-носителей либо моментов и мест схода снежных лавин, повысило актуальность разработки быстрого детектора инфразвуковых событий. Применение инфразвуковых групп, состоящих всего из трех регистрирующих датчиков (микробарографов или низкочастотных микрофонов) позволило оптимизировать алгоритмы обнаружения целевых сигналов и расчета их азимутальных параметров. Таким образом, была разработана программа *QACD* – автоматический детектор инфразвуковых сигналов, сочетающий в себе быстроту выявления целевых сигналов и высокую достоверность результатов.

Созданный автоматический детектор может использоваться для мониторинга различных природных и техногенных процессов, в результате которых генерируются инфразвуковые сигналы. Более того, он может работать в близком к реальному режиму времени, что позволит оперативно оповещать потребителей информации о зафиксированных событиях. Реализованные в упомянутом детекторе алгоритмы оценки длительности сигналов и изменчивости их азимутальных параметров позволяют в автоматическом режиме выявлять сигналы, порожденные движущимися объектами.

Проведенные экспериментальные работы по мониторингу лавинной активности инфразвуковым методом на полуострове Камчатка подтвердили высокую скорость обработки данных, поступающих в близком к реальному режиму времени и высокую достоверность результатов работы представленного детектора.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание № 075-00576-21) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира” (<https://ckprf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

- Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А., Кременецкая Е.О., Прокудина А.В. О результатах наблюдений на Апатитском сейсмо-инфразвуковом комплексе // Вестник МГТУ. 2008. Т. 11, № 3. С.512–518.
- Асминг В.Э., Евтюгина З.А., Виноградов Ю.А., Федоров А.В. Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками // Вестник МГТУ. 2009. Т. 12, № 2. С.300–307.
- Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Воронин А.И., Федоров А.В., Чигерев Е.Н., Роскин О.Г. Определение мест падений фрагментов ракет-носителей по данным инфразвуковых наблюдений // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 6. С.707–715.
- Виноградов Ю.А. Сейсмоинфразвуковой комплекс “Апатиты” – новый инструмент дистанционного геомониторинга в Евро-Арктическом регионе // Север-2003: Проблемы и решения. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 2004. С.103–108.
- Виноградов Ю.А., Асминг В.Э., Баранов С.В., Федоров А.В., Виноградов А.Н. Сейсмоинфразвуковой мониторинг деструкции ледников (пилотный эксперимент на архипелаге Шпицберген) // Сейсмические приборы. 2014. Т. 50, № 1. С.5–14.
- Воробьев Н.Н., Егоров В.И., Ерущенков А.И., Куличков С.Н., Матвеев А.К., Орлов В.В., Пономарев Е.А., Смирнова Н.А., Сорокин А.Г. О приеме низкочастотных акустических волн на больших расстояниях от импульсных источников // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. М.: Наука, 1986. Вып. 75. С.189–201.
- Евтюгина З.А., Асминг В.Э. О регистрации падения болида 16.11.2017 г. инфразвуковыми станциями севера Европы // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных: Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С.99–102.
- Карпинский В.В., Асминг В.Э. Результаты первичной обработки данных инфразвуковой группы на острове Валаам // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2, № 1. С.85–91.
- Федоров А.В., Федоров И.С., Воронин А.И. Регистрация снежных лавин сейсмоинфразвуковым методом // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы XIII Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2018. С.273–276.
- Blandford R.R. An automatic event detector at the Tonto Forest seismic observatory // Geophysics. 1974. V. 39, N 5. P.633–643.
- Brown P.G., Whitaker R.W., ReVelle D.O., Tagliaferri E. Multi-station infrasonic observations of two large bolides: Signal interpretation and implications for monitoring of atmospheric explosions // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, N 13. P.14-1–14-4.
- Burg J.P. Three-dimensional filtering with an array of seismometers // Geophysics. 1964. V. 29, N 5. P.693–713.
- Cansi Y. An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method // Geophys. Res. Lett. 1995. V. 22, N 9. P.1021–1024.
- Cansi Y., Le Pichon A. Infrasound Event Detection Using the Progressive Multi-Channel Correlation Algorithm // Handbook of Signal Processing in Acoustics. New York: Springer, 2008. P.1425–1435.
- Gibbons S.J., Asming V., Eliasson L., Fyen J., Heikkinen P., Kero J., Kozlovskaya E., Kvaerna T., Liszka L., Nasholm S.P., Roth M., Vinogradov Y. The European Arctic: A Laboratory for Seismo-Acoustic Studies // Seismological Research Letters. 2015. V. 86, N 3. P.917–928.
- Marchetti E., Ripepe M., Olivieri G., Kogelnig A. Infrasound array criteria for automatic detection and front velocity estimation of snow avalanches: towards a real-time early-warning system // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. 2015. V. 3. P.2709–2737. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2545-2015>

- Melton B.S., Bailey L.F. Multiple signal correlators // *Geophysics*. 1957. V. 22, N 3. P.565–588.
- Pilger C., Ceranna L., Le Pichon A., Brown P. Large Meteoroids as Global Infrasound Reference Events // *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Cham: Springer, 2019. P.451–470. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_12
- Shumway R.H. On detecting a signal in N stationary correlated noise series // *Technometrics*. 1971. V. 13, N 3. P.499–520.
- Smart E., Flinn E.A. Fast Frequency-Wavenumber Analysis and Fisher Signal Detection in Real-Time Infrasonic Array Data Processing // *Geophysical Journal International*. 1971. V. 26. P.279–284.

Сведения об авторах

АСМИНГ Владимир Эрнестович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Кольский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 184200, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14. Тел.: +7(815) 557-94-94. E-mail: asming@krsc.ru

ФЕДОРОВ Андрей Викторович – кандидат физико-математических наук, директор, Кольский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 184200, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14. Тел.: +7(815) 557-94-94. E-mail: AFedorov@krsc.ru

ВИНОГРАДОВ Юрий Анатольевич – кандидат технических наук, директор, Федеральный исследовательский центр “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 249035, Калужская область, г. Обнинск, просп. Ленина, д. 189. Тел.: +7(484) 397-14-41. E-mail: yvin@gsras.ru

ЧЕБРОВ Данила Викторович – кандидат физико-математических наук, директор, Камчатский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бул. Пийпа, д. 9. Тел.: +7(415) 243-59-03. E-mail: danila@emsd.ru

БАРАНОВ Сергей Владимирович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Кольский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 184200, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14. Тел.: +7(815) 557-97-35. E-mail: BarS@krsc.ru

ФЕДОРОВ Иван Сергеевич – младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Кольский филиал Федерального исследовательского центра “Единая геофизическая служба Российской академии наук”. 184200, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14. Тел.: +7(815) 557-97-09. E-mail: Fedorov@krsc.ru

FAST INFRASONIC EVENT DETECTOR AND ITS APPLICATION

V.E. Asming¹, A.V. Fedorov¹, Yu.A. Vinogradov², D.V. Chebrov³,
S.V. Baranov¹, I.S. Fedorov¹

¹ Kola Branch of Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia

² Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Obninsk, Russia

³ Kamchatka Branch of Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia
Corresponding author: A.V. Fedorov (e-mail: AFedorov@krsc.ru)

Abstract. The work is devoted to the development of methods and algorithms for automatic detection of useful signals in a noisy environment on the records of infrasonic groups. Overview of the most common methods for processing infrasonic signals is given. A set of algorithms and the sequence of their application for the rapid detection of infrasonic signals on the records of infrasonic groups, implemented in the form of automatic detector, are described. The performance of the described detector is achieved by optimizing the calculations and by preliminary calculation of some of the parameters for infrasonic groups consisting of three sensors. The relevance of the use of fast algorithms for the detection of target signals is dictated by a number of applied problems for the rapid detection of places where infrasonic signals are generated, for example, when searching for spent elements of launch vehicles or monitoring avalanche-prone slopes in mountainous areas. The automatic detector described in the work evaluates a number of standard parameters of the detected acoustic signals, such as source azimuth, angles of incidence of infrasonic waves, and apparent velocities. Additionally, algorithms for estimating the duration of the recorded signals and variability of the source azimuth are implemented. The last two parameters are used to automatically detect moving sources of infrasonic emissions. The testing of the application of the described detector in the near-real time mode was carried out within the framework of experimental work on infrasonic monitoring of avalanche activity on the Kamchatka Peninsula in February–April 2020. The results of using the detector showed a high reliability of the obtained solutions. Automatically detected signals and associated with avalanche manifestations were verified by visual inspection of the area.

Keywords: detection, infrasound, sources of infrasonic signals, infrasonic monitoring, snow avalanches.

Funding

The work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (no. 075-00576-21). The data used in the work were obtained with large-scale research facilities “Seismic infrasound array for monitoring Arctic cryolitozone and continuous seismic monitoring of the Russian Federation, neighbouring territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Conflict of interest

The authors declare they have no conflict of interest.

References

- Asming V.E., Vinogradov Y.A., Evtyugina Z.A., Kremenetskaya E.O., Prokudina A.V., On the results of observations at the Apatity seismic-infrasound complex, *Vestnik MGTU* (Vestnik of MSTU), 2008, vol. 11, no. 3, pp. 512-518. [in Russian].
- Asming V.E., Evtyugina Z.A., Vinogradov Yu.A., Fedorov A.V., Analysis of infrasonic signals generated by technogenic sources, *Vestnik MGTU* (Vestnik of MSTU), 2009, vol. 12, no. 2, pp. 300-307. [In Russian].
- Asming V.E., Vinogradov Y.A., Voronin A.I., Fedorov A.V., Chigerev E.N., Roskin O.G., Determining places of falling of launch vehicle fragments using infrasonic observations, *Izv. Atmos. Ocean. Phys.*, 2016, vol. 52, pp. 629-636. <https://doi.org/10.1134/S0001433816060037>
- Blandford R.R., An automatic event detector at the Tonto Forest seismic observatory, *Geophysics*, 1974, vol. 39, pp. 633-643.
- Brown P.G., Whitaker R.W., ReVelle D.O., Tagliaferri E., Multi-station infrasonic observations of two large bolides: Signal interpretation and implications for monitoring of atmospheric explosions, *Geophysical Research Letters*, 2002, vol. 29, no. 13, pp. 14-1-14-4.
- Burg J.P., Three-dimensional filtering with an array of seismometers, *Geophysics*, 1964, vol. 29, no. 5, pp. 693-713.
- Cansi Y., An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method, *Geophysical Research Letters*, 1995, vol. 22, no. 9, pp. 1021-1024.
- Cansi Y., Le Pichon A., Infrasound Event Detection Using the Progressive Multi-Channel Correlation Algorithm, *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, New York: Springer, 2008, pp. 1425-1435.

- Evtuygina Z.A., Asming V.E., On the registration of a bolide fall on November 16, 2017 by infrasound stations in northern Europe, in *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* (Modern methods of processing and interpretation of seismological data: Materials of the XIII International Seismological School), Obninsk: FRC EGS RAS, 2018, pp. 99-102. [in Russian].
- Fedorov A.V., Fedorov I.S., Voronin A.I., Registration of snow avalanches using the seismic-infrasound method, in *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Materialy XIII Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly* (Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Materials of the XIII International Seismological School), Obninsk: FRC EGS RAS, 2018, pp. 273-276. [in Russian].
- Gibbons S.J., Asming V., Eliasson L., Fyen J., Heikkinen P., Kero J., Kozlovskaya E., Kvaerna T., Liszka L., Nasholm S.P., Roth M., Vinogradov Y., The European Arctic: A Laboratory for Seismo-Acoustic Studies, *Seismological Research Letters*, 2015, vol. 86, no. 3, pp. 917-928.
- Karpinsky V.V., Asming V.E., Results of primary processing of infrasound group data on Valaam Island, *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* (Russian Seismological Journal), 2020, vol. 2, no. 1, pp. 85-91. [in Russian].
- Marchetti E., Ripepe M., Olivieri G., Kogelnig A., Infrasound array criteria for automatic detection and front velocity estimation of snow avalanches: towards a real-time early-warning system, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2015, vol. 3, pp. 2709-2737, <https://doi.org/10.5194/nhess-15-2545-2015>
- Melton B.S., Bailey L.F., Multiple signal correlators, *Geophysics*, 1957, vol. 22, no. 3, pp. 565-588.
- Pilger C., Ceranna L., Le Pichon A., Brown P., Large Meteoroids as Global Infrasound Reference Events, *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, Cham: Springer, 2019, pp. 451-470. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75140-5_12
- Shumway R.H., On detecting a signal in N stationary correlated noise series, *Technometrics*, 1971, vol. 13, no. 3, pp. 499-520.
- Smart E., Flinn E.A., Fast Frequency-Wavenumber Analysis and Fisher Signal Detection in Real-Time Infrasound Array Data Processing, *Geophysical Journal International*, 1971, vol. 26, pp. 279-284.
- Vinogradov Y.A., Seismic-infrasound array "Apatity" – a new tool for remote geomonitring in the Euro-Arctic region, *Sever-2003: Problemy i resheniya* (North-2003: Problems and solutions), Apatity: Izdatel'stvo KNC RAN, 2004, pp. 103-108. [in Russian].
- Vinogradov Y.A., Asming V.E., Baranov S.V., Fedorov A.V., Vinogradov A.N., Seismic and infrasonic monitoring of glacier destruction: A pilot experiment on Svalbard, *Seismic Instruments*, 2015, vol. 51, pp. 1-7.
- Vorobiev N.N., Egorov V.I., Eruschenkov A.I., Kulichkov S.N., Matveev A.K., Orlov V.V., Ponomarev E.A., Smirnova N.A., Sorokin A.G., On the reception of low-frequency acoustic waves at large distances from pulsed sources, *Issledovaniya po geomagnetizmu, aeronomii i fizike Solntsa* (Research on geomagnetism, aeronomy and physics of the Sun), Moscow: Nauka, 1986, vol. 75, pp. 189-201. [in Russian].

About the authors

ASMING Vladimir Ernestovich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Kola branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Fersman str., 14, Apatity, Murmansk region, 184200, Russia. Ph.: +7(815) 557-94-94. E-mail: asming@krsc.ru

FEDOROV Andrey Victorovich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Director, Kola branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Fersman str., 14, Apatity, Murmansk region, 184200, Russia. Ph.: +7(815) 557-94-94. E-mail: AFedorov@krsc.ru

VINOGRADOV Yury Anatolievch – Cand. Sci. (Eng.), Director, Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Lenin av., 189, Obninsk, Kaluga region, 249035, Russia. Ph.: +7(484) 397-14-41. E-mail: yvin@gsras.ru

CHEBROV Danila Victorovich – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Director, Kamchatka branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Piipa bul., 9, Petropavlosk-Kamchatskiy, 683006, Russia. Ph.: +7(415) 243-59-03. E-mail: danila@emsd.ru

BARANOV Sergey Vladimirovich – Dr. Sci. (Phys.-Math.), Leading Researcher, Kola branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Fersman str., 14, Apatity, Murmansk region, 184200, Russia. Ph.: +7(815) 557-97-35. E-mail: BarS@krsc.ru

FEDOROV Ivan Sergeevich – Junior Researcher, Kola branch of Geophysical Survey of Russian Academy of Sciences, Fersman str., 14, Apatity, Murmansk region, 184200, Russia. Ph.: +7(815) 557-97-09. E-mail: Fedorov@krsc.ru