

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФРАЗВУКОВОГО МЕТОДА ДЛЯ МОНИТОРИНГА ДЕСТРУКЦИИ ЛЕДНИКОВ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

© 2016 г. В. Э. Асминг, С. В. Баранов, А. Н. Виноградов,
Ю. А. Виноградов, А. В. Федоров

Кольский филиал Геофизической службы РАН

18420 Россия, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Ферсмана 14

E-mail: bars.vl@gmail.com

Поступила в редакцию 27.10.2015 г.

Исследовано применение инфразвукового метода для регистрации акустической эмиссии в инфразвуковом диапазоне, вызываемой деструкцией ледников в Арктике. Рассмотрены основные подходы и методы автоматического детектирования сигналов по данным инфразвуковых микрогрупп с точки зрения их практического использования в условиях частых и значительных вариаций уровня шума, характерных для арктического побережья. Предложен новый метод автоматического обнаружения инфразвуковых событий, основанный на представлении сигнала плоской волной и адаптивной оценке уровня шума. Метод позволяет обнаруживать сигналы при малом числе датчиков (до трех) в специфических условиях арктического побережья. Приведены результаты инфразвукового мониторинга деструкции выводных ледников Ис-фиорда (архипелаг Шпицберген), осуществленного Кольским филиалом Геофизической службы Российской академии наук в 2011–2012 годах.

Ключевые слова: инфразвуковой мониторинг, детектирование инфразвуковых сигналов, деструкция ледников, Шпицберген, Арктика.

DOI: 10.7868/S0320791916040031

ВВЕДЕНИЕ

Процессы деструкции ледников – растрескивание (crevassing), аномально-быстрые подвижки (surging) пульсирующих ледников, краевое обрушение выводных ледников, налегающих на поверхность моря (calving of tide glaciers) – генерируют как сейсмические сигналы [1–3], так и акустическую эмиссию [1, 4–7]. До последнего времени акустическому сопровождению деструкции ледниковых покровов в научной литературе уделялось меньше внимания, чем сейсмичности ледников, в отношении которой в последние годы даже введено новое понятие – “льдотрясения” (“icequakes”) [8]. Вместе с тем, опыт Геофизической службы РАН показал, что применение инфразвукового мониторинга позволяет существенно расширить информативность систем дистанционного контроля состояния природной среды и достичь определенного прогресса в прогнозировании опасных явлений, связанных с воздействием потепления климата на криосферу. В частности, таких динамических процессов, как аномально быстрые подвижки горно-долинных ледников или откол крупных айсбергов [5].

В октябре 2010 г. Кольский филиал Геофизической службы РАН (КоФ ГС РАН) в рамках пилот-

ного эксперимента по комплексному мониторингу геофизических полей на архипелаге Шпицберген установил инфразвуковую микрогруппу BRBV на южном побережье Ис-фиорда у устья залива Грин-фиорд вблизи российского поселка Баренцбург. Микрогруппа состоит из трех микрофонов, расположенных в вершинах равнобедренного треугольника со сторонами около 225 м и основанием в 150 м (рис. 1). Расстояние между датчиками сопоставимо с длинами инфразвуковых волн. Такое расположение датчиков позволяет моделировать зарегистрированный сигнал плоской волной, параметры которой одинаковы на всех датчиках группы и различаются лишь временем прихода.

К настоящему времени инфразвуковая группа BRBV является единственным инструментом, предназначенным для непрерывной регистрации инфразвуковых колебаний в этой части Арктики. Программно-аппаратная организация системы инфразвукового мониторинга подробно описана в работе [4]. В настоящей работе рассматриваются вопросы обнаружения инфразвуковых событий в условиях арктического побережья.

При проведении инфразвукового мониторинга в условиях арктического побережья необходи-

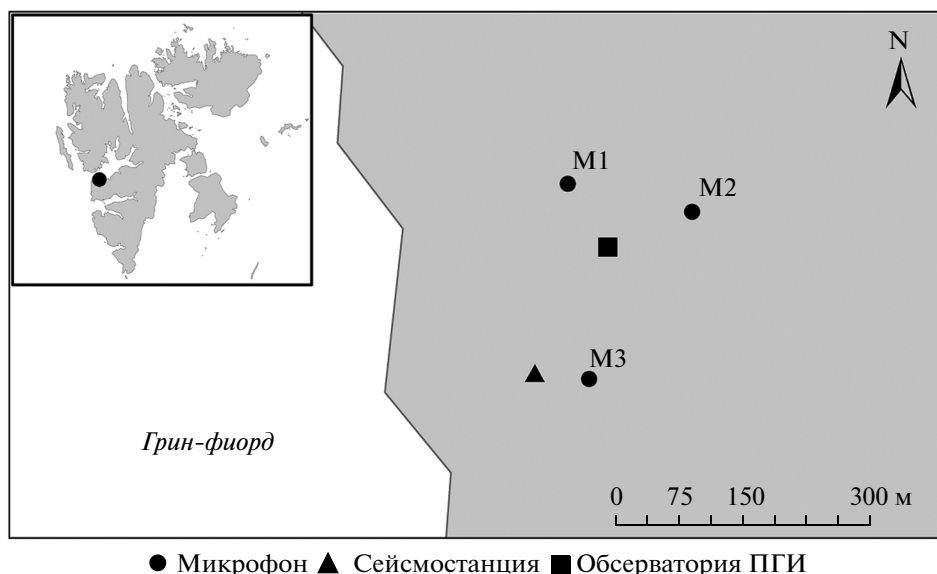


Рис. 1. Географическое местоположение и расположение компонент инфразвуковой группы BRBB на площадке геофизического полигона Российского научного центра на архипелаге Шпицберген.

мо учитывать вариации метеорологической обстановки, проявляемые как в сезонном, так и в суточном и даже часовом масштабах времени. Чрезвычайно изрезанный рельеф местности на архипелаге Шпицберген также усиливает амплитуды колебаний скорости и направления ветра [9], что, в свою очередь, приводит к усилению колебаний уровня инфразвукового шума [10, 11]. Среднемесячные значения скоростей ветра, рассчитанные по многолетним наблюдениям, находятся в диапазоне от 5.4 м/с в феврале до 2.4 м/с в январе; среднесуточные значения скорости ветра находятся в диапазоне от 16 до 0 м/с по данным метеостанции в аэропорту Свальбарда [12], расположенной на расстоянии 33 км к востоку от микрогруппы BRBB в сходных условиях. Указанные метеорологические особенности приводят к тому, что на инфразвуковых записях микрогруппы BRBB присутствуют частые и значительные вариации уровня фонового шума, вызванные резкими изменениями скорости и направления ветра, а также и прибойными волнами. Эти факторы необходимо учитывать при проведении инфразвукового мониторинга в арктических условиях.

Цель работы — обоснование надежных средств мониторинга деструкции ледниковых покровов в условиях Арктики. Для достижения этой цели рассматриваются основные подходы и методы детектирования инфразвуковых сигналов по данным микрогрупп с точки зрения их применения в арктических условиях. Предлагается новый метод автоматического обнаружения инфразвуковых событий, основанный на представлении сигнала плоской волной и адаптивной оценки уровня шума. Метод позволяет надежно обнаруживать сиг-

налы при малом числе датчиков — вплоть до трех — в частых и значительных вариациях уровня шума. В качестве иллюстрации применения предлагаемого метода приводятся результаты двухлетнего инфразвукового мониторинга, проводимого КоФ ГС РАН на архипелаге Шпицберген.

ОБЗОР ОСНОВНЫХ ПОДХОДОВ И МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО ДАННЫМ МИКРОГРУПП

Общий подход к детектированию акустических сигналов по данным микрогрупп основан на представлении инфразвукового сигнала плоской волной, зарегистрированной всеми датчиками. Поскольку в микрогруппе расстояние между датчиками сопоставимо с длиной волны, то сигнал на разных сенсорах является идентичным с точностью до временных задержек прихода волны на датчики группы. В то же время, фоновый шум меняется от датчика к датчику.

Одним из первых методов обнаружения сигналов по данным инфразвуковых микрогрупп является детектор, основанный на частотно-волновом анализе (F - K -анализ) и использовании F -статистики. Изначально этот метод возник в сейсмологии для обнаружения сигналов от сейсмических событий (см., например, [13]) и впоследствии был адаптирован для детектирования инфразвуковых сигналов [14]. Суть метода заключается в вычислении взаимного спектра каналов, который зависит 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 [14]. Затем каждый обнаруженный локальный максимум проверяется на соответствие инфразвуковому сигналу с помощью F -детектора [15]. С этой целью используется F -статистика, которая во временной области имеет вид [14, 16]

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

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

Выражение (1) записано при условии, что каждый канал группы имеет нулевое среднее. Это ограничение является естественным, поскольку при практическом использовании запись подвергается предварительной фильтрации с целью выделения полосы частот, в которой амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) группы является плоской, либо полосы, где ожидается сигнал.

F -статистика (1) является отношением сигнал/шум. Действительно, числитель в (1) – энергия зарегистрированного группой сигнала с учетом временных задержек, а в знаменателе стоит сумма квадратов разностей амплитуд каждого канала и сформированного луча, что является оценкой энергии некоррелированного шума. Вопросы, связанные с определением азимута с помощью пространственной фильтрации при наличии помехи рассматриваются в работе [17]. 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 [18]. Отметим, что чем больше датчиков в микрогруппе, тем точнее F -статистика оценивает отношение сигнал/шум.

F -статистика является случайной величиной, имеющей распределение Фишера (F -распределение) с $2BT$, $2BT(J-1)$ степенями свободы [18], где B – ширина полосы частот, в которой проводится детектирование, T – длина временного окна в секундах, J – число датчиков в группе. Решение о наличии сигнала (энергия сигнала больше энергии шума) принимается с помощью F -критерия. Нулевая гипотеза H_0 : энергия коррелированного сигнала не больше энергии некоррелированного шума; гипотеза H_1 : энергия сигнала больше энер-

гии шума. Если наблюдаемое значение F -статистики (1) оказалось больше критического значения, получаемого для одностороннего F -распределения с $2BT$, $2BT(J-1)$ степенями свободы при заданном уровне значимости (1 или 5%), то мощность сигнала значимо превосходит мощность шума, и анализируемый фрагмент записи объявляется сигналом. В противном случае нет оснований для отклонения нулевой гипотезы – сигнал отсутствует.

Отметим, что данный метод позволяет обнаруживать сигналы в условиях постоянно меняющегося уровня шума при условии, что внутри текущего временного окна уровень шума постоянен. Данный метод успешно применялся на акустической группе LAMA (штат Монтана, США), состоящей из 13 сенсоров [14]. Однако для успешного применения метода необходимо большое число датчиков в группе. Кроме того, в случае наличия коррелированного шума данный метод дает много ложных срабатываний, принимая шум за сигнал. Таким образом, использование данного метода для обработки данных микрогруппы BRBB (рис. 1) представляется затруднительным из-за малого числа датчиков и наличия коррелированных шумов.

Другим методом автоматического детектирования инфразвуковых сигналов является алгоритм последовательной многоканальной корреляции (Progressive Multichannel Correlation, PMCC), предложенный в работе [19]. Идея PMCC-алгоритма заключается в использовании взаимной корреляционной функции каналов для вычисления временных задержек прихода волны на датчики и анализа согласованности сигналов на разных датчиках. Используя преобразование Фурье, инфразвуковой сигнал $s(t)$ может быть представлен как набор плоских волн: $S(f) = A(f) \exp(i\varphi(f))$, где $A(f)$ – спектральная амплитуда; $\varphi(f)$ – фаза. В случае микрогруппы параметры сигнала на разных сенсорах должны быть идентичными с учетом времен прихода сигнала на разные сенсоры; параметры же фонового шума меняются от датчика к датчику. При таких предположениях для любых двух датчиков микрогруппы справедливы соотношения [2]

$$A_2(f) = A_1(f), \quad \varphi_2(f) = \varphi_1(f) - \mathbf{k}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2), \quad (2)$$

где \mathbf{k} – волновой вектор, направленный перпендикулярно фронту волны и имеющий длину, равную волновому числу: $|\mathbf{k}| = 2\pi f/V$, где V – локальная скорость звука; $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ – координаты 1-го и 2-го датчиков соответственно. Соотношения (2) показывают, что структура сигнала идентична на всех датчиках микрогруппы. Единственное отличие заключается в наличии временных задержек прихода сигнала на разные датчики.

Когда звуковая волна распространяется без искажений, вызванных шумами, задержка прихо-

да сигнала между двумя датчиками i и j является постоянной для всех частот [19]:

$$\Delta t_{ij} = \frac{1}{2\pi f} (\varphi_j(f) - \varphi_i(f)). \quad (3)$$

В таких условиях для микрогруппы, состоящей из трех сенсоров, сумма задержек на разных датчиках равна нулю:

$$\Delta t_{12} + \Delta t_{23} + \Delta t_{31} = 0. \quad (4)$$

Когда в микрогруппе более трех датчиков, то номера датчиков в (4) определяются при обходе группы единообразно – либо по часовой стрелке, либо в обратную сторону. В этом случае времена задержек удобно перенумеровать в порядке обхода датчиков, обозначив через Δt_j . Если на датчиках присутствует только некоррелированный шум, то равенство (4) не выполняется, поскольку фаза шума очень изменчива на разных частотах и задержки являются независимыми случайными величинами, сумма которых не равна нулю. При практическом использовании на записях присутствует как сигнал, так и фоновый шум. В этом случае (4) опосредованно характеризует отношение коррелированного сигнала к некоррелированному шуму, что может быть использовано для детектирования.

В РМСС-алгоритме [19] для измерения когерентности сигнала на разных датчиках и оценивания задержек используется взаимная корреляционная функция, вычисляемая во временном окне длины W :

$$\text{Cогр}_{ij}(\tau) = \sum s_i(t)s_j(t + \tau), \quad (5)$$

где i, j – номера датчиков в микрогруппе. Момент времени τ , на котором достигается максимум корреляционной функции (5), является задержкой прихода сигнала на датчик j относительно датчика i . Такой способ определения задержки значительно проще, чем F - K -анализ.

На первом шаге алгоритма РМСС вычисляются временные задержки с помощью максимизации корреляционной функции (5). Вычисления проводятся в окне, длина которого W должна быть больше максимального времени пробега звуковой волны между датчиками микрогруппы. Такой размер окна позволяет сгладить корреляционную функцию и уменьшить количество ложных срабатываний. Временной сдвиг между последовательными положениями окна не должен превышать W . Меньшие значения сдвига обеспечивают большее разрешение по времени.

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

$$\left| \sum \Delta t_j \right| < h, \quad (6)$$

где Δt_j – временная задержка прихода сигнала на j -й датчик; h – заранее выбранный порог согласо-

ванности, больший, чем период дискретизации сигнала. Инфразвуковой сигнал считается обнаруженным, если выполнено условие (6). Величина h используется для принятия решения о наличии или отсутствии сигнала на анализируемом участке записи, поэтому ее выбор особенно важен. Слишком малое значение h приведет к пропуску сигнала, слишком большое значение – к большому количеству ложных срабатываний. Кроме того, на выбор величины h оказывает влияние уровень шума: чем больше уровень шума, тем больше следует выбирать h . Отметим, что условие (6) можно заменить F -критерием, предварительно рассчитав статистику Фишера (1).

На третьем шаге алгоритма для участка записи, на котором выполнено условие (6), определяются азимут волны α , угол ее наклона к дневной поверхности β (угол тангажа) с помощью решения системы уравнений:

$$\Delta t_j = (\Delta X_j \cos \alpha + \Delta Y_j \sin \alpha) \cos \beta / V, \quad j = 1, \dots, J, \quad (7)$$

где ΔX_j и ΔY_j – координаты (в метрах) датчиков в прямоугольной декартовой системе, начало которой совпадает с центром группы, ось ординат направлена на север, ось абсцисс – на запад. Другим способом определения азимута является обобщенный метод азимутальной декомпозиции с использованием нерегулярно расположенных микрофонов, предложенный в работе [20].

РМСС-алгоритм имеет такой же недостаток, как и метод, основанный на F - K -анализе: большое число ложных срабатываний при наличии коррелированного шума. Другой недостаток – отсутствие возможности адаптировать порог согласованности h в (6) для подстройки под вариации уровня шума, обусловленные, например, погодными явлениями. Это затрудняет применение РМСС-алгоритма для обнаружения инфразвуковых сигналов в условиях арктического побережья.

Для устранения воздействия коррелированного шума был предложен модифицированный F -детектор [21], идея которого заключается в масштабировании F -статистики (1) в зависимости от отношения энергий коррелированного и некоррелированного шумов. Если присутствует коррелированный шум, то F -статистика (1) имеет распределение [21]

$$cF(2BT, 2BT(J - 1)). \quad (8)$$

Здесь P_s – энергия коррелированного шума; P_n – энергия некоррелированного шума. Оценка коэффициента c осуществляется таким образом, чтобы добиться максимального соответствия теоретической и наблюдаемой гистограмм F -распределения с $2BT$, $2BT(J - 1)$ степенями свободы. Сделать это можно, например, с помощью метода наименьших квадратов.

Алгоритм работы модифицированного F -детектора состоит из трех шагов. На первом шаге запись микрогруппы анализируется в скользящем

временном окне, при этом для каждого положения окна рассчитываются задержки прихода волны на датчики микрогруппы с помощью F -К-анализа или РМСС-алгоритма, и вычисляются наблюдаемые значения F -статистик (1). На втором шаге выполняется подбор масштабирующего коэффициента c (9), чтобы гистограмма наблюдаемых значений F -статистики соответствовала теоретической гистограмме F -распределения с $2BT$, $2BT(J - 1)$ степенями свободы. На третьем шаге с помощью F -критерия, в котором F -статистика имеет вид (8), принимается решение, являются ли просмотренные на первом шаге участки записи инфразвуковыми сигналами или шумами.

Для успешного применения модифицированного F -детектора требуется микрогруппа с числом датчиков больше 3, поскольку для оценки уровня отношения сигнал/шум с помощью F -статистики (1) трех датчиков явно недостаточно. Кроме того, метод предполагает неизменность уровня коррелированного шума в течение времени, необходимого для набора статистики наблюдаемых значений F -распределения. Если это условие не выполнено, то модифицированный F -детектор будет давать много ложных срабатываний, принимая меняющийся коррелированный шум за сигнал. Вследствие совокупного действия перечисленных факторов использование модифицированного F -детектора для обработки данных микрогруппы BRBB является затруднительным и неэффективным.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ИНФРАЗВУКОВЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ЧАСТО МЕНЯЮЩЕГОСЯ УРОВНЯ ШУМА

Местоположение инфразвуковой группа BRBB на возвышенном берегу Грин-фиорда характеризуется сильными изменчивыми ветрами и наличием инфразвуковой эмиссии, вызванной волнами прибоя. Эти составляющие формируют фоновый шум, в том числе коррелированный, уровень которого может меняться несколько раз в течение часа. В этих условиях использование типовых алгоритмов дает большое число ложных срабатываний. Использование же модифицированного F -детектора также затруднено из-за малого числа датчиков в группе. Для эффективного обнаружения импульсных сигналов в этой неблагоприятной обстановке был разработан специальный детектор, не требующий применения F -К-анализа. Принцип его работы заключается в следующем.

Пусть $s_j(i)$ – i -й отсчет записи, полученной на j -м датчике инфразвуковой группы ($j = 1, \dots, J$; $i = 1, \dots, N$), u – время между последовательными отсчетами. Рассмотрим плоскую волну, приходящую на датчики с азимута α и с углом β к дневной поверхности (рис. 2). Задержки времен приходов волны на датчики группы задаются соотношени-

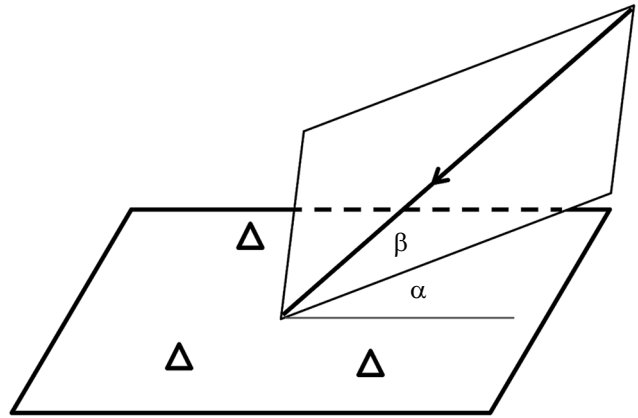


Рис. 2. Приход плоской волны на группу.

ем (7). Задержки, выраженные в количестве отсчетов: $\Delta i_j = [\Delta t_j / u]$, $[\cdot]$ – операция округления.

Для каждой пары углов (α , β) определим два типа “пучков”:

а) средний “пучок”

$$A_i = \frac{1}{J} \left| \sum_{j=1}^J s_j(i - \Delta i_j) \right|, \quad (10)$$

б) максимальный “пучок”

$$M_i = \max_j |s_j(i - \Delta i_j)|. \quad (11)$$

Функции (10) и (11) зависят от азимута α и тангажа β . В идеальном случае, когда (α , β) – истинные параметры падающей плоской волны, датчики одинаковы, отсутствует шум и затухание сигнала из-за рельефа, $A_i = M_i$. В реальных же условиях обычно $A_i < M_i$. Отношение A_i / M_i фактически является мерой согласованности сигналов на разных датчиках: чем ближе A_i / M_i к единице, тем лучше согласованы сигналы. Отношение A_i / M_i может быть использовано для детектирования, однако при малых значениях M_i возникает неопределенность. Избежать этого можно, усреднив значения A_i и M_i в скользящем окне:

$$\langle A \rangle_i = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^W A_{i+j-1}, \quad \langle M \rangle_i = \frac{1}{W} \sum_{j=1}^W M_{i+j-1}, \quad (12)$$

где W – длина окна в отсчетах. Если анализируемый участок записи содержит сигнал, то должно выполняться условие

$$R_i = \langle A \rangle_i / \langle M \rangle_i, \quad R_i > h > 0. \quad (13)$$

Пятнадцатилетний опыт эксплуатации первой в мире арктической инфразвуковой группы в составе СИЗК “Апатиты” в Мурманской области показал, что инфразвуковые записи на разных датчиках могут различаться до полутора раз. Эти различия непостоянны и зависят от направления прихода инфразвукового сигнала и локальных особенностей рельефа [22]. Указанные факторы

уменьшают отношение R_i , что приводит к необходимости уменьшения значения порога детектирования h в (13), вследствие чего значительно возрастает количество ложных срабатываний. Чтобы устранить этот недостаток, акустические записи предварительно нормируются на собственные средние в скользящем окне. После нормировки вычисляются средний и максимальный “пучки” (12) и когерентность (13), которую обозначим ее через H_i .

Нормировка устраняет проблему в разнице амплитуд, но порождает новый источник ложных срабатываний – участки записей, содержащие коррелированный шум, после нормализации оказываются когерентными. Чтобы преодолеть это затруднение, для детектирования следует использовать оба отношения: полученное по исходным записям R_i и по нормализованным H_i . Для отношения R_i устанавливается меньший порог срабатывания (0.6), который гарантирует, что амплитуды записей на разных датчиках близки друг к другу. Для нормализованного отношения H_i устанавливается больший порог (0.8), который гарантирует высокую когерентность участков записей с разных датчиков группы.

Третьим параметром, используемым для детектирования, является отношение сигнал/шум, рассчитываемое для среднего “пучка” $\langle A \rangle_i$ следующим образом. “Пучок” представляет собой набор положительных чисел, большая часть которых является преобразованной записью шума, и только малая часть отсчетов принадлежит сигналу. За оценку уровня шума L в текущем положении окна принимается среднее значение первых 20% отсчетов, упорядоченных по возрастанию. Уровень шума оценивается каждый раз при смещении временного окна в следующую позицию, что позволяет отслеживать его изменение. Этот простой способ адаптивной оценки отношения сигнал–шум позволяет учесть быстроменяющийся шум, в том числе и коррелированный.

Детектор производит перебор по углу α (азимут) от 0° до 359° с шагом 1° и по углу β (тангаж) от 0° до 80° с шагом 10° . Участок записи считается соответствующим инфразвуковому событию, если для некоторого набора пар (α, β) выполнены следующие три условия:

$$SNR_i = \langle A \rangle_i / L > 2, \quad (14)$$

$$R_i > 0.6, \quad (15)$$

$$H_i > 0.8. \quad (16)$$

Условие (14) гарантирует, что на обнаруженном участке записи отношение сигнал/шум больше заданного порога; условие (15) – амплитуды записей на разных датчиках группы близки друг к другу; условие (16) – когерентность участков записей с разных датчиков группы. Отметим, что расчет выражений (14)–(16) значительно проще,

чем применение F - K -анализа и вычисление статистики Фишера (1) в F -детекторе или взаимной корреляционной функции (5) и суммы задержек (6) в РМСС-алгоритме. Углы α и β определяются с помощью максимизации функции вида

$$G_i(\alpha, \beta) = R_i H_i (1 - e^{-SNR_i}) \rightarrow \max_{(\alpha, \beta)}. \quad (18)$$

В качестве значений азимута и тангажа прихода волны принимаются значения углов α и β , обеспечивающие максимум функции G (18). Отметим, что значение тангажа зависит от состояния атмосферы, расстояния до источника и рельефа в месте установки микрогруппы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНФРАЗВУКОВОГО МОНИТОРИНГА НА ШПИЦБЕРГЕНЕ

В качестве конкретного примера применения предложенного метода детектирования приведем краткую характеристику результатов инфразвукового мониторинга ледников северного побережья Ис-фиорда, осуществленного КоФ ГС РАН в 2011–2012 гг. с помощью инфразвуковой микрогруппы BRBB (рис. 1). Детектирование выполнялось в полосах частот 1–5 и 5–15 Гц (цифровая запись предварительно пропускалась через два полосовых фильтра). Для полосы 1–5 Гц длина временного окна W в (12) равна 3 с, длина окна W_1 для нормировки записей на собственные средние равна 5 с; для полосы 5–15 Гц – $W = W_1 = 1$ с.

За период наблюдений было обнаружено 894 инфразвуковых события, не считая акустической эмиссии от полетов самолетов и вертолетов, которые идентифицировались по наличию эффекта Доплера (рис. 3). Распределение азимутов зарегистрированных событий приведено на рис. 4 и 5. К сожалению, по данным одной группы невозможно определить координаты источника инфразвуковой эмиссии, поскольку имеются лишь продольные волны. Поэтому каталог инфразвукового мониторинга содержит только азимуты, времена прихода волн на группу BRBB и кажущиеся скорости.

События, азимуты которых направлены в южную полуплоскость от станции BRBB (от 90° до 270°) связаны с антропогенной активностью в поселке Баренцбург (рис. 4). Азимуты 83% инфразвуковых событий лежат в диапазоне от 315° до 45° (направление по часовой стрелке) и направлены на ледники Эсмарка и Нансена, находящиеся на расстоянии соответственно 20 и 30 км от станции BRBB (рис. 4, 5). Поскольку эти направления свободны от антропогенной активности, то логично предположить, что большая часть инфразвуковых событий связана с процессами, происходящими в соответствующих ледниках. Пример записи станцией BRBB инфразвукового сигнала, вызванного “льдотрясениями” на лед-

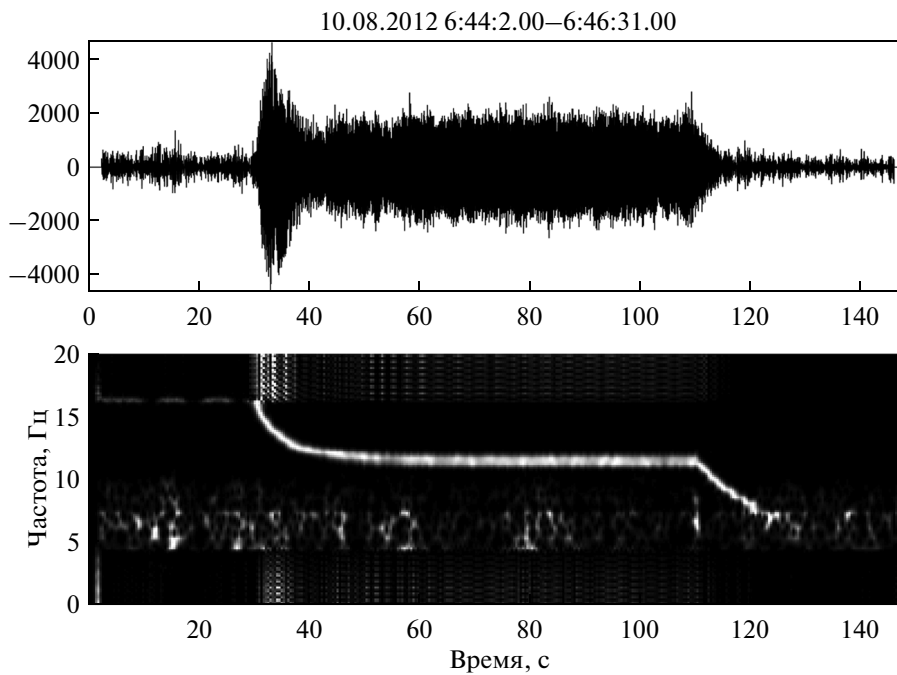


Рис. 3. Пример инфразвукового события с эффектом Доплера. Верхний график – волновая форма; нижний график – спектрограмма, показывающая изменение несущей частоты с течением времени.

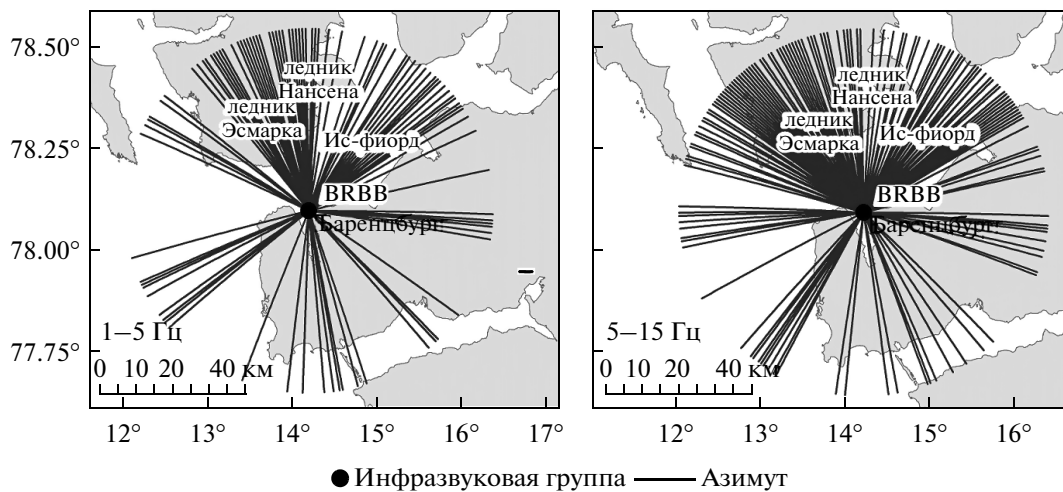


Рис. 4. Азимуты инфразвуковых событий, зарегистрированных группой BRBB в 2011–2012 гг. в диапазонах частот 1–5 и 5–15 Гц.

нике Эсмарка, показан на рис. 6 (координаты эпицентра были определены независимым путем при помощи сейсмостанции ESM, расположенной вблизи ледника [23]).

В пользу гипотезы о ледниковой природе акустической эмиссии свидетельствует тот факт, что большинство событий, азимуты которых направлены на ледники Нансена и Эсмарка, наблюдается в августе, при этом месячные вариации количества событий (рис. 7а) не зависят от скорости ветра [24] (рис. 7б), которая является основной

помехой, препятствующей надежной регистрации инфразвуковых сигналов. Сопоставляя вариации количества инфразвуковых событий и температуры воздуха в приземном слое за 2011 г. [24] (рис. 7в), можно заметить, что увеличение акустической активности совпадает с периодом положительных температур. В июне температура воздуха становится положительной, начинается таяние ледников, и через месяц увеличивается количество инфразвуковых событий с соответствующих направлений. Вероятно, фиксиру.ncz

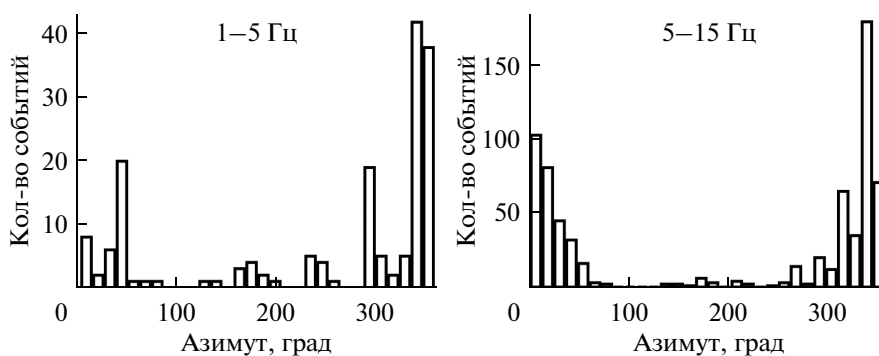


Рис. 5. Гистограммы азимутов инфразвуковых событий, зарегистрированных группой BRBB в 2011–2012 гг. в диапазонах частот 1–5 и 5–15 Гц.

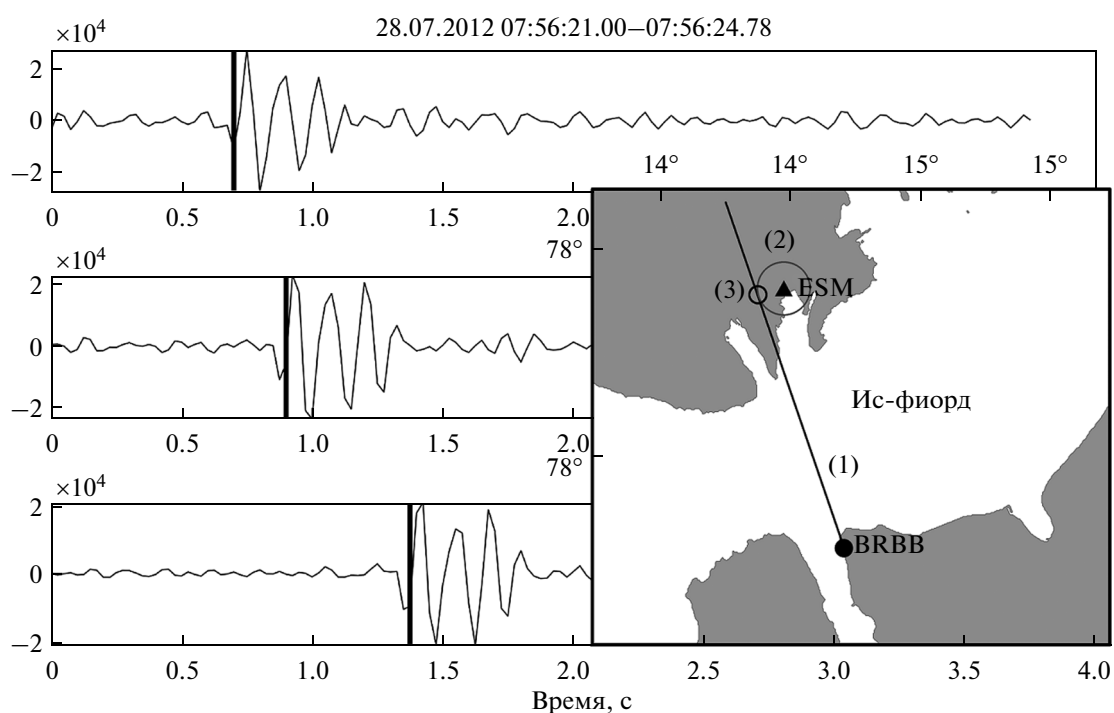


Рис. 6. Пример записи инфразвукового события, на леднике Эсмарка микрогруппой BRBB. Вертикальные прямые соответствуют временам прихода звуковой волны на датчики микрогруппы: (1) азимут, рассчитанный по инфразвуковой группе BVBB; (2) круг, полученный по разности времен прихода волн P и S на сейсмостанцию ESM; (3) эпицентр инфразвукового события.

акустические проявления часто наблюдаемого явления “весеннего ускорения” (“spring speed up”) ледников, инициированного изменением гидрологического режима из-за увеличения потока талых вод [25]. В силу климатических особенностей архипелага Шпицберген термин “весеннее ускорение” более уместно заменить “летним ускорением”. Дальнейшая интенсификация процесса таяния в августе приводит к еще большему усилению акустической активности (рис. 7а, 7в). В сентябре вместе с понижением среднемесячной температуры воздуха начинает уменьшаться и количество инфразвуковых событий.

Вариации инфразвукового шума за 2011 г. также обнаруживают связь с процессами, происходящими в криосфере под действием вариаций температуры приземного слоя атмосферы. При оценивании среднемесячного уровня шума из акустической записи предварительно удалялись события и “пиковые выбросы”, затем рассчитывалась среднемесячная амплитуда [4]. Подобно количеству событий, месячные вариации шума (рис. 7в) также не обнаруживают зависимости от скорости ветра (рис. 7б) и достигают максимума в теплый период года. Максимальный уровень шума приходится на сентябрь (рис. 7г). Возможно,

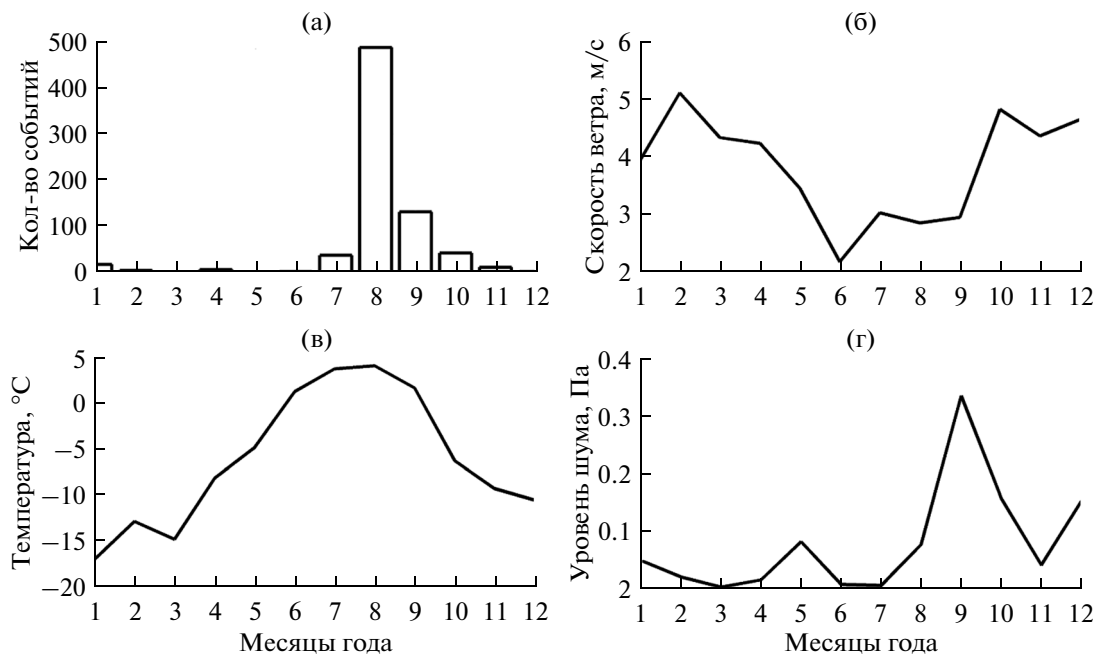


Рис. 7. Месячные вариации акустических и метеорологических параметров (данные норвежской станции GRU-VEFJELLET [24]) за 2011–2012 гг. в районе сейсмоинфразвуковой станции BRBB: (а) количество зарегистрированных инфразвуковых событий, азимуты которых направлены в район ледников Нансена и Эсмарка (рис. 4); (б) скорость ветра; (в) температура воздуха на высоте 1 м; (г) уровень инфразвукового шума.

именно из-за высокого уровня шума количество зарегистрированных инфразвуковых событий в сентябре меньше, чем в августе.

Обнаруженные сезонные вариации акустической эмиссии в 2011–2012 гг. согласуются с ранее обнаруженными вариациями количества слабых сейсмических событий на архипелаге Шпицберген по данным региональной сети за 1998–2008 гг. [26]. По итогам комплексной интерпретации данных инфразвукового и сейсмологического мониторинга в районе залива Ис-фиорда сделан вывод, что акустическая эмиссия на Шпицбергене в значительной мере генерируется процессами, происходящими в криосфере архипелага и контролируется сезонными вариациями температуры воздуха.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ традиционных подходов и методов автоматического обнаружения акустических сигналов по данным инфразвуковых микрогрупп выявил ряд недостатков, затрудняющих или делающих малоэффективным их практическое использование в системах дистанционного геофизического мониторинга процессов деструкции криосферы. С учетом специфики природных условий на арктическом побережье предложена новая методика автоматического детектирования инфразвуковых событий. Она позволяет минимизировать число датчиков в микрогруппе до трех и обеспечить при этом надежное обнаружение сигналов от точеч-

ных и линейных источников [27] импульсной инфразвуковой эмиссии в условиях резкого изменения метеорологической обстановки и уровня фонового шума.

Предложенная методика испытана в ходе двухлетнего эксперимента по комплексному сейсмологическому и инфразвуковому мониторингу района выводных ледников Эсмарка и Нансена на северном побережье Ис-фиорда на архипелаге Шпицберген. Она подтвердила реальную возможность непрерывного дистанционного контроля временного хода деструктивных процессов в ледовом покрове с косвенной оценкой интенсивности динамических явлений и локализацией в пространстве участков активного трещинообразования и калвинга.

Исходя из результатов пилотного эксперимента на архипелаге Шпицберген и многолетнего опыта КоФ ГС РАН по применению инфразвукового мониторинга горно-промышленных районов в континентальных условиях Евро-Арктического региона [22, 28], можно рекомендовать включение инфразвуковых микрогрупп в состав комплексных систем геофизического мониторинга опасных геодинамических явлений в Арктической зоне Российской Федерации. Наиболее полезно такое дополнение региональных мониторинговых сетей на арктических островных архипелагах вблизи фронта образования айсбергов, создающего угрозу безопасности морским нефтегазовым промыслам [6, 29]. Также оно перспек-

тивно в тех районах криосферы, где присутствуют близповерхностные залежи метановых газогидратов, разложение которых при потеплении климата или техногенном воздействии может провоцировать взрывоподобные явления с выбросами горючих газов и кратерообразованием на поверхности [5, 30, 31].

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России при выполнении прикладных научных исследований и экспериментальных разработок (ПНИЭР) по теме “Создание новых методов и средств мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки на архипелаге Шпицберген и в Западной Арктической зоне Российской Федерации” (Соглашение о предоставлении субсидии от 20.10.2014 № 14.610.21.0006, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61014X0006).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Amundson J.M., Fahnestock M., Truffer M., Brown J., Lüthi M.P., Motyka R.J.* Ice mélange dynamics and implications for terminus stability, Jakobshavn Isbræ, Greenland // *J. Geophys. Res.: Earth Surface*. 2010 (2003–2012). 115(F1).
2. *Kohler A., Chapuis A., Nuth C., Kohler J., Weidle C.* Autonomous detection of calving-related seismicity at Kronebreen, Svalbard // *Cryosphere*. 2012. V. 6. P. 393–406.
3. *Lefauconnier B., Hagen J.O.* Surging and calving glaciers in eastern Svalbard // *Norsk Polarinstitutt Medlelser*. Oslo: NPI, 1991. 116 p.
4. *Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов Ю.А., Воронин А.И.* Сейсмоинфразвуковой мониторинг на Шпицбергене // *Сейсмические приборы*. 2012. Т. 48. № 3. С. 20–33.
5. *Виноградов Ю.А., Виноградов А.Н.* Перспективы развития инфразвукового и сейсмического мониторинга волновых полей в районе архипелага Шпицберген / Комплексные исследования природы Шпицбергена. Апатиты: КНЦ РАН, 2005. Вып. 5. С. 1070–1110.
6. *Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А., Маловичко А.А.* Применение сейсмоинфразвукового метода мониторинга природной среды для контроля геодинамического режима в зонах активного освоения недр Карского шельфа и Ямала // *Вестн. Кольского научного центра РАН*. 2014. Т. 19. № 4. С. 23–32.
7. *Епифанов В.П., Глазовский А.Ф.* Акустические характеристики как индикатор особенностей движения льда в ледниках // *Криосфера Земли*. 2010. Т. 14. № 4. С. 42–55.
8. *Nettles M., Ekström G.* Glacial earthquakes in Greenland and Antarctica // *Annual Rev. Earth and Planetary Sciences*. 2010. V. 38. № 1. P. 467–491.
9. *Whiteman C.D.* Mountain Meteorology: Fundamentals and Applications. New York: Oxford University Press, 2000. 355 p.
10. *Bowman J.R., Eli Baker G.E., Bahavar M.* Ambient infrasound noise // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L09803.
11. *Le Pichon A., Blanc E., Hauchecorne A.* Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies. Springer, ISBN 978-1-4020-9507-8, 2010. 735 p.
12. *Petersson C.* An analysis of the local weather around Longyearbyen and an instrumental comparison / The University Centre in Svalbard, Department of Arctic Geophysics Meteorology. 2006. p. 50.
13. *Burg J.P.* Three-dimensional filtering with an array of seismometers // *Geophys.* 1964. V. 29. P. 693–713.
14. *Smart E., Flinn E.A.* Fast frequency–wavenumber analysis and Fisher signal detection in real-time infrasonic array data processing // *Geophys. J. Royal Astronomic Society*. 1971. V. 26. P. 279–284.
15. *Melton B.S., Bailey L.F.* Multiple signal correlators // *Geophys.* 1957. V. 22. P. 565–588.
16. *Shumway R.H.* On detecting a signal in N stationarily correlated noise series // *Technometr.* 1971. V. 13. P. 499–520.
17. *Калёнов Е.Н.* Потенциальная точность измерения угловых координат источников сигналов и точность их измерения при оптимальной пространственной фильтрации // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 2. С. 225–232.
18. *Blandford R.R.* An automatic event detector at the Tonto Forest seismic observatory // *Geophys.* 1974. V. 39. P. 633–643.
19. *Cansi Y.* An automatic seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 1021–1024.
20. *Копьев В.Ф., Фараносов Г.А.* Обобщение метода азимутальной декомпозиции звукового поля компактного источника на случай измерений вблизи жесткой поверхности // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 1. С. 65–68.
21. *Arrowsmith S.J., Whitaker R., Katz C., Hayward C.* The F -detector revisited: an improved strategy for signal detection at seismic and infrasound arrays // *Bull. Seismological Society America*. 2009. V. 99. № 1. P. 449–453.
22. *Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А., Кременецкая Е.О., Прокудина А.В.* О результатах наблюдений на Апатитском сейсмо-инфразвуковом комплексе // *Вестн. МГТУ*. 2008. Т. 11. № 3. С. 512–518.
23. *Vinogradov Yu.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. V. 51. № 1. P. 1–7.
24. Данные метеонаблюдений на сайте университета UNIS. http://www.unis.no/20_RESEARCH/2060_Online_Env_Data/weatherstations.htm.
25. *Willis I.C.* Interannual variations in glacier motion – A review // *Progress in Physical Geography*. 1995. V. 19. P. 61–106.
26. *Асминг В.Э., Баранов С.В., Виноградов А.Н., Виноградов Ю.А.* Сезонный характер сейсмичности в районе архипелага Шпицберген // *Вестн. МГТУ*. 2009. Т. 12. № 4. С. 571–575.

27. *Цыбульская Н.Д., Куличков С.Н., Чуличков А.И.* Исследование возможности классификации инфразвуковых сигналов от разных источников // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 434–441.
28. *Асминг В.Э., Евтюгина З.А. Виноградов Ю.А., Федоров А.В.* Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками // Вестн. МГТУ. 2009. Т. 12. № 2. С. 107–110.
29. *Виноградов Ю.А., Дмитриев В.Г.* Инновационные технологии сейсмоинфра-звукового мониторинга и детектирования опасных геодинамических явлений в районах разведки и добычи энергетических сырьевых ресурсов Западной Арктики // Российские полярные исследования. 2015. Т. 20. № 2. С. 28–29.
30. *Богоявленский В.И.* Выбросы газа и нефти на суше и акваториях Арктики и Мирового океана // Бурение и нефть. 2015. № 6. С. 4–10.
31. *Якушев В.С.* Природный газ и газогидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.