

УДК 550.34.034 (470.21)

## Анализ инфразвуковых сигналов, генерируемых техногенными источниками

В.Э. Асминг<sup>1</sup>, З.А. Евтюгина<sup>1,2</sup>, Ю.А. Виноградов<sup>1</sup>, А.В. Федоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кольский филиал геофизической службы РАН, Апатиты

<sup>2</sup> Апатитский филиал МГТУ, кафедра геоэкологии

**Аннотация.** Проведены эксперименты по локации источников инфразвука при помощи сети инфразвуковых групп, включающих Апатиты и шведско-финскую сеть. С помощью созданной в КФ ГС РАН программы ACL (ассоциатор приходов и локатор акустических сигналов) несколько событий по пересечению азимутов слотированы в район космодрома Плесецк. На примере повторяющихся взрывов, происходивших на полигоне в северной Финляндии, проведен анализ вариаций оценок азимутов и кажущихся скоростей приходов звуковых волн на датчики Апатитской группы. Получены оценки точности локации этих взрывов. Показано, что связь между погодными условиями и фактом наличия или отсутствия первого прихода инфразвуковой волны действительно существует.

**Abstract.** Some experiments have been carried out by phase association and infrasonic sources location using the Apatity infrasound array and Finnish-Swedish acoustic network. Several events from the area of Plesetsk spaceport have been detected and located. The analysis of variation of backazimuth estimations has been done basing on signals from repeating military explosion in Northern Finland. Estimations of the location accuracy for the explosions have been obtained. It has been confirmed that cause-effect relation exists between facts of presence or absence of infrasonic wave first arrivals and weather conditions.

**Ключевые слова:** источники инфразвука, детектирование, локация, ассоциация фаз, взрывы

**Key words:** infrasound sources, detection, location, phase association, explosions

### 1. Введение

Кольский филиал геофизической службы Российской академии наук (КФ ГС РАН) проводит работы очередного этапа проекта Международного научно-технического центра (<http://www.istc.ru>) "Исследование совместного распространения сигналов от источников инфразвуковых и сейсмических волн для улучшения характеристик инфразвукового метода контроля за проведением ядерных испытаний". Для реализации инфразвукового метода контроля соблюдения Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний необходимо уметь идентифицировать инфразвуковые сигналы от взрывов и прочих проявлений техногенной активности, а также производить локацию мест возбуждения инфразвуковых событий по сети инфразвуковых групп. Для идентификации событий необходимо собрать как можно большую базу данных сигналов от известных источников, для локации – научиться выделять из множества сигналов, приходящих на различные регистрирующие группы, те, которые соответствуют одним и тем же инфразвуковым событиям. Также важно иметь представление о влиянии состояния атмосферы на изменение скоростей и азимутов распространения сигналов для внесения необходимых корректировок.

Для анализа инфразвуковых сигналов в КФ ГС РАН были разработаны несколько программ: ACD, ACL, BARPLOT.

### 2. Программные средства для анализа инфразвуковых данных

Инфразвуковой (акустический) детектор ACD (Асминг и др., 2008а) – программное средство, позволяющее обнаруживать сигналы (их количество достигает нескольких сотен в месяц) и определять азимуты их прихода.

В КФ ГС РАН для локации акустических событий по сети инфразвуковых групп была разработана программа ACL (Асминг и др., 2008b) – ассоциатор приходов и локатор акустических сигналов, которая действует на основе алгоритма "generalized beamforming" (Ringdal, Kvaerna, 1990). Принцип работы программы следующий: область поиска событий (круг, с произвольно заданным центром, как правило, в середине группы станций) равномерно покрывается меньшими кругами – ячейками сетки (в первой версии – радиусом 50 км). Для каждой ячейки делается поиск тех фаз (приходов волн на станции), которые могли бы быть порождены акустическим событием внутри ячейки-круга (подходящие азимуты с запасом 10°). Затем выбирается наибольший набор фаз, которые могли бы быть порождены событием в данной ячейке сетки и совместимы по временам пробега (для кажущихся

скоростей инфразвуковых волн от 0.25 до 0.35 км/с). Число фаз в этом максимальном наборе принимается за рейтинговую функцию  $RC$  ячейки. Программа ищет максимальное значение рейтинговой функции  $RC_{\max}$  по всем ячейкам. Если  $RC_{\max} \geq 3$ , считается, что найденное событие произошло в данной ячейке. Программа выбрасывает сассоциированные таким образом фазы из списков детектирования, и процедура повторяется снова до тех пор, пока остаются ячейки с  $RC \geq 3$ . В результате создается список наборов подходящих друг другу фаз и определенных по ним координат акустических событий.

В первой версии программы за координаты события принимались координаты центра ячейки, для которого были сассоциированы фазы. Во второй версии центр ячейки является исходной точкой, а координаты события рассчитываются при помощи градиентной минимизации невязки оценок азимутов по всем станциям.

Интерактивный анализ вариаций азимута и скорости инфразвуковых волн проводится с помощью программы просмотра кросс-корреляций и когерентностей **BARPLOT**, разработанной в КФ ГС РАН в 2007 и апробированной в 2008 году.

В программе используются функции кросс-корреляции или когерентности записей на разных датчиках в зависимости от предполагаемого азимута подхода сигнала ( $\alpha$ ) и кажущей скорости ( $\alpha, v, t_0, t_1 = v_{\text{звука}}/\cos(\beta)$ ), где  $\beta$  – угол подхода волны к земной поверхности. Функции рассчитываются для некоторого временного интервала  $[t_0, t_1]$ . При расчете значений этих функций записи по каждому каналу сдвигают на время, зависящее от предполагаемых угла и скорости подхода волны, а затем либо коррелируются друг с другом, либо используются для вычисления когерентности. Другими словами, функции когерентности  $Coh(\alpha, v, t_0, t_1)$  и кросс-корреляции  $CC(\alpha, v, t_0, t_1)$  являются рейтинговыми функциями для обнаружения инфразвуковых событий: чем больше значения этих функций, тем больше вероятность того, что на данном временном интервале записано событие, пришедшее с азимута  $\alpha$  со скоростью  $v$ . Программа **BARPLOT** позволяет отображать значения любой из этих рейтинговых функций (далее –  $R(\alpha, v, t_0, t_1)$ ) при фиксации тех или иных параметров.

Реализованы следующие варианты построения  $R$ :

1. Для фиксированного времени  $t$ . Пользователь указывает интервал на графике исходных данных (рис. 6а). Функция  $R(\alpha, v) = R(\alpha, v, t-\Delta t/2, t+\Delta t/2)$  отображается оттенками цвета, где  $\Delta t$  – ширина скользящего окна для расчета когерентности или кросс-корреляции.
2. Для фиксированной скорости  $v$ , заданной пользователем (по умолчанию 0.34 км/с), оттенками цвета отображается функция  $R(\alpha, t) = R(\alpha, v=\text{const}, t-\Delta t/2, t+\Delta t/2)$ . Это позволяет отслеживать изменение азимута события в зависимости от времени (рис. 4; 6б).
3. Для фиксированного азимута  $\alpha$ , заданного пользователем, оттенками цвета отображается функция  $R(v, t) = R(\alpha=\text{const}, v, t-\Delta t/2, t+\Delta t/2)$ . В этом варианте отображение значений функций позволяет отслеживать изменение кажущейся скорости прихода волны события в зависимости от времени.

В программе **BARPLOT** реализована возможность двигаться по записи скользящим окном и для каждого его положения считать максимум кросс-корреляции по углу и кажущейся скорости. В результате генерируется таблица изменения кросс-корреляции, азимута и скорости в зависимости от времени.

### 3. Сигналы от промышленных взрывов в Мурманской области и Карелии

Большое количество источников возбуждения инфразвуковых волн приводит к тому, что пока еще не все сигналы могут быть идентифицированы, поэтому важно собрать базу данных типичных сигналов известного происхождения.

В Мурманской области и северной Карелии выполняется большой объем горных работ, сопровождающихся массовыми взрывами. Кроме того, взрывы иногда используются при дорожных работах и в деятельности военных (рис. 1). КФ ГС РАН рутинно регистрирует как сейсмические (*Асминг*, 1997), так и акустические сигналы от таких взрывов.

Определить источник инфразвукового сигнала для подобных взрывов легко – координаты рассчитываются по сейсмическим данным. Если кажущаяся скорость прихода звуковой волны (расстояние от источника до приемника, деленное на время пробега) находится в диапазоне  $0.25 \div 0.35$  км/с, и одновременно азимуты приходов звуковой и сейсмической волн совпадают с точностью  $\pm 5^\circ$ , значит, ассоциация сейсмического и акустического сигналов верна (рис. 2).

### 4. Регистрация пусков ракет

Эксперимент по ассоциации фаз и локации акустических событий был проведен совместно по данным Апатитской группы и шведско-финской инфразвуковой сети (рис. 5). Эта сеть поддерживается шведским Институтом космической физики в Умеå. Данные имеются в свободном доступе на сайте института (<http://neptun.umea.irf.se/~peje/infrasound/>). Каждая шведско-финская инфразвуковая группа состоит из трех микрофонов. Частота дискретизации 18 отсчетов в секунду. Хотя эти группы менее

чувствительны, меньшей апертуры и с меньшей частотой опроса, чем Апатитская, их совместное использование может помочь выработать алгоритм совместной обработки сигналов.

Во время эксперимента по локации инфразвуковых сигналов с помощью программы ACL были обнаружены, в частности, три события, формы сигналов которых на разных станциях были очень похожи (рис. 3). Одно из событий (23.01.2007) слочировано по пересечению азимутов в район космодрома Плесецк (врезка на рис. 3).

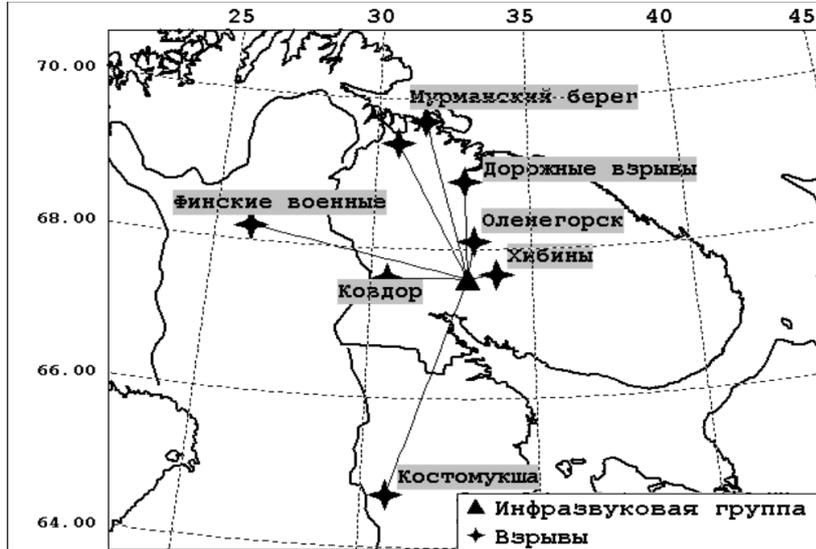
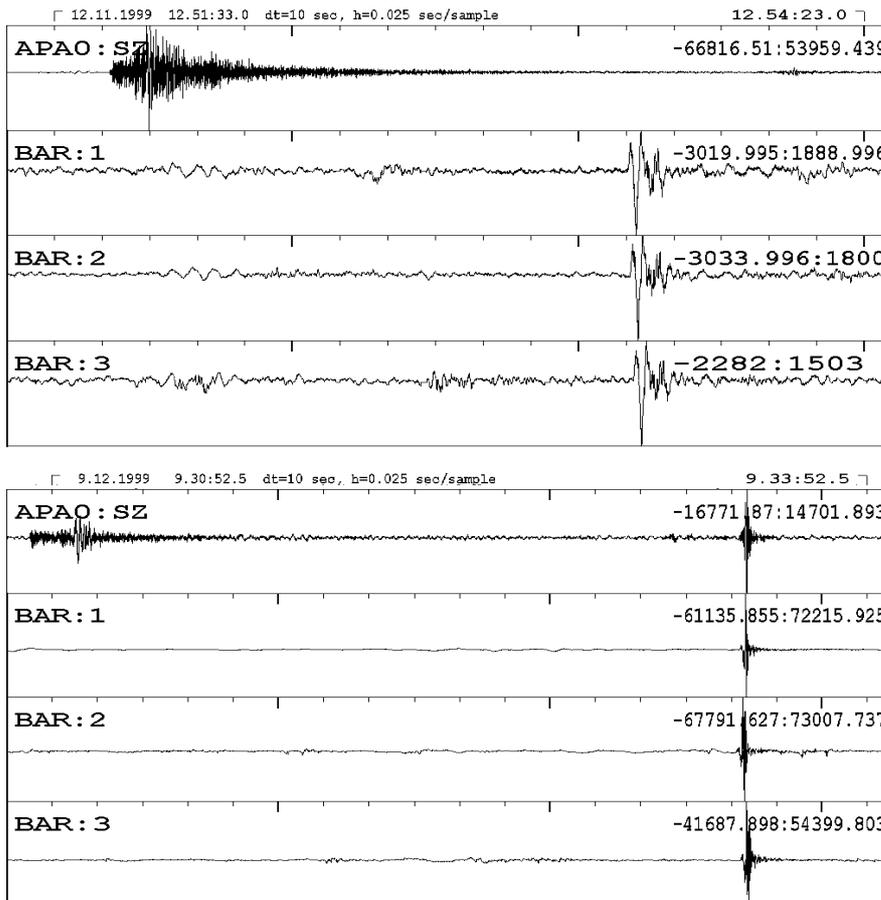


Рис. 1. Районы проведения взрывов, откуда Апатитская инфразвуковая группа регистрирует сигналы



а) Взрыв на руднике Центральный (Хибинский массив)

б) Взрыв в карьере (Оленегорск)

Рис. 2. Примеры регистрации Апатитским сейсмоинфразвуковым комплексом (СИЗК) сейсмических и инфразвуковых сигналов промышленных взрывов. Акустические сигналы (BAR: 1; 2; 3) видны даже на сейсмических записях (AP0:SZ)

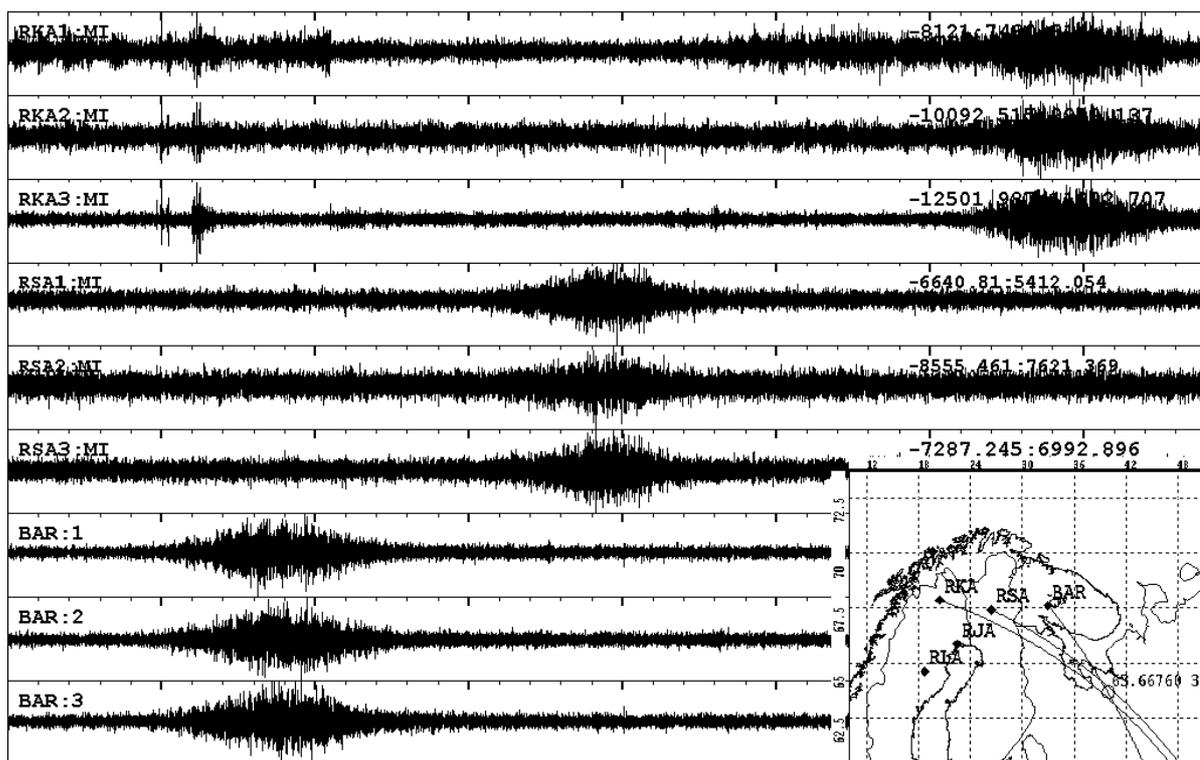


Рис. 3. Записи события 23.01.2007 станциями Кируна (RKA), Соданкюля (RSA) и Апатиты (BAR).  
 Формы огибающих сигналов очень похожи

Ассоциации, полученные программой ACL, для двух других событий были аналогичными, то есть в результате локации по пересечению азимутов место событий попадает в ячейку-круг, охватывающий район Плесецка. Записи довольно длинные (несколько минут) и для одной из них азимут менялся со временем, то есть объект, генерирующий звук, двигался (рис. 4).

В настоящее время в КФ ГС РАН накоплено около десятка записей, соответствующих пускам с космодрома Плесецк, про некоторые из них были объявления в средствах массовой информации. Кроме этого имеются записи инфразвуковых событий, произошедших в дни пусков ракет "Булава" и "Синева" с акваторий Белого и Баренцевого морей.

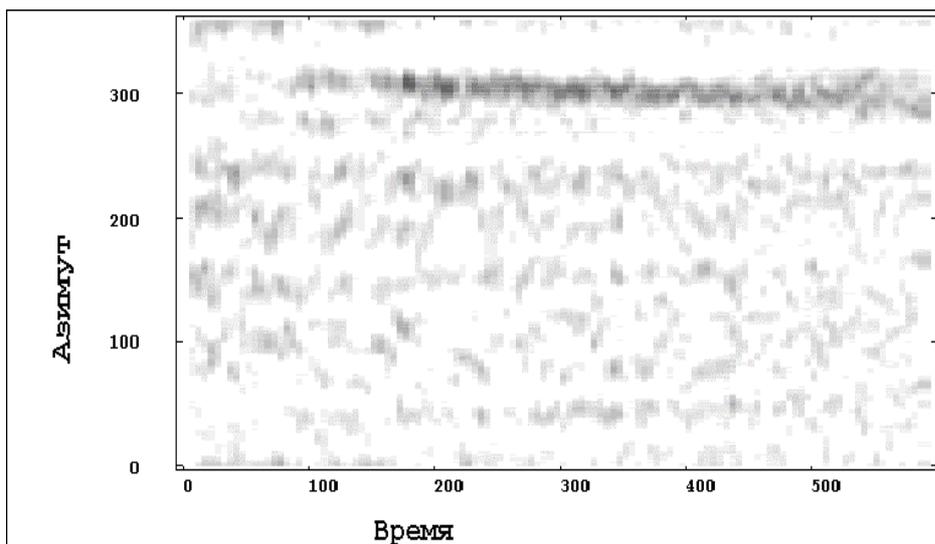


Рис. 4. Кросс-корреляция каналов Апатитской группы (BAR: 1; 2; 3 – рис. 3) в зависимости от времени и азимута события 23.01.2007 (в программе BARPLOT азимут отсчитывается от направления на восток против часовой стрелки)

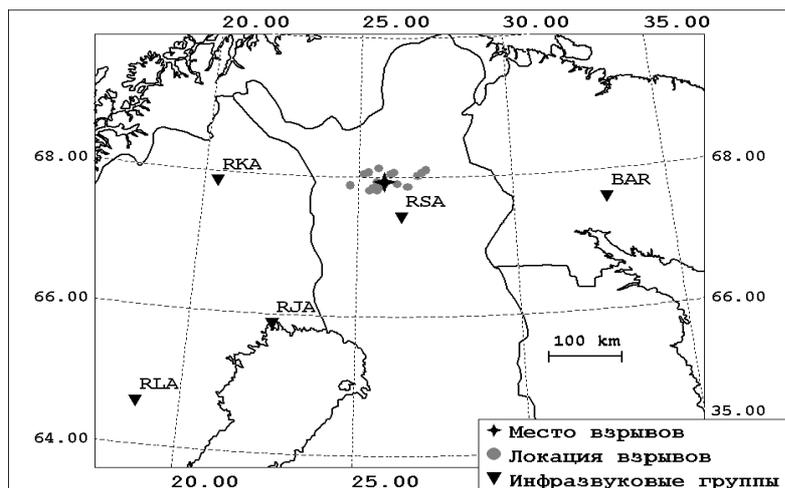
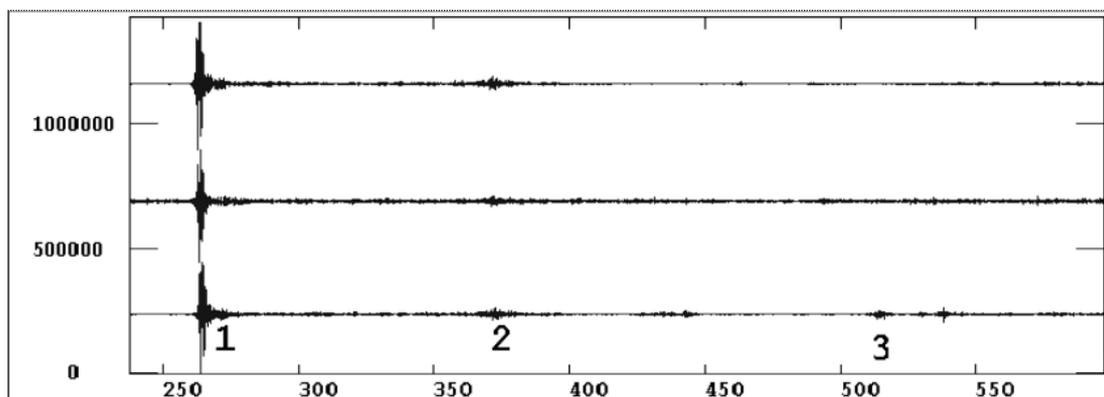
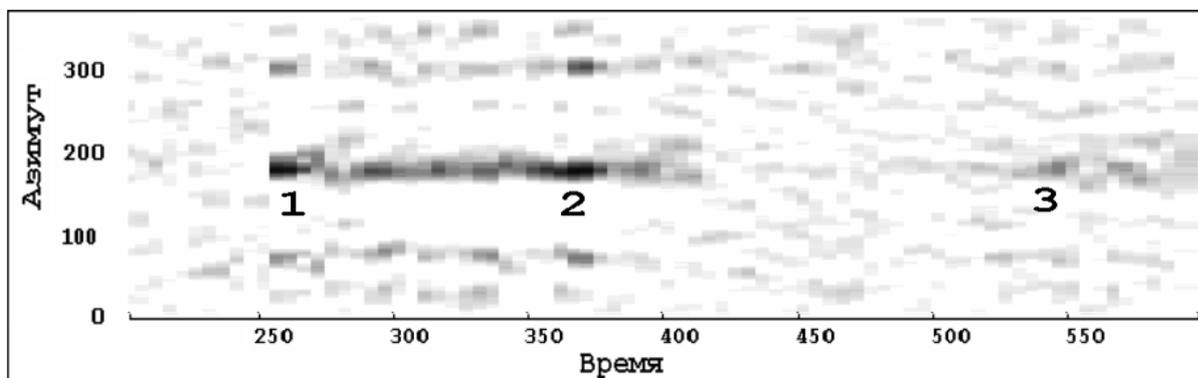


Рис. 5. Расположение инфразвуковых групп: станция Апатиты – BAR; финско-шведская сеть: Кируна (RKA); Соданкюля (RSA); Лулео (RJA); Лукселе (RLA)



а) Исходная запись (взрыв 16.08.07 в 8 час)



б)  $R(\alpha, t)$  при  $v = \text{const} = 0.34$  км/сек. Видно, что в течение существенного времени азимут подхода волны не меняется и остается равным примерно  $170^\circ$ .

Рис. 6. Иллюстрация анализа акустических сигналов от финских взрывов

### 5. Уничтожение устаревшего оружия финскими военными

Финские военные начали уничтожение старого оружия 15 августа 2007 года. Примерные координаты места взрывов 68.2N, 26.1E получены сейсмической локацией по данным сейсмических групп ARCESS (Норвегия), расположенной в 178 км от места взрыва, и Апатиты. Информация о том, что финские военные проводят такие взрывы, была предоставлена доктором Кваегна (Норвежский сейсмологический институт NORSAR), которого уведомили об этом финские коллеги. Более точные координаты были впоследствии переданы доктору Кваегна финскими сейсмологами, побывавшими на месте взрывов: 67.934 N, 25.832 E. Взрывы проводились дважды в день, примерно в 7.30 или 8.00 GMT – первый и 10.00, 10.30, 11.00, 11.30 или 12.00 GMT – второй. Типичные магнитуды взрывов – около 1.5 (информация об истинных временах и магнитудах событий доступна на сайте NORSAR <http://www.norsar.no>). Расстояние от места взрывов до Апатитской группы – 304 км, азимут –  $170^\circ$ .

Финские военные взрывы производились на небольшом полигоне размерами не более  $300 \times 300$  м. Поэтому по результатам их локации можно, в принципе, оценить точность метода.

Данные с 15 августа по 16 сентября 2007 года были выбраны по инфразвуковым группам Kiruna (RKA, 226 км от места взрывов), Jamton (RJA, 272 км), Lyckelse (RLA, 485 км) и Апатиты (BAR, 304 км). Записи сигналов ближней станции Sodankyla (RSA, 62 км от места взрывов) были исключены, чтобы проверить возможность и точность локации по достаточно удаленным акустическим группам (рис. 5).

Из 33 событий было обнаружено и слоицировано 29, причем сигналы от одного и того же события приходили несколько раз, и только у 7 взрывов наблюдались три прихода (рис. 6а).

Однако кросс-корреляция каналов группы в зависимости от времени и азимута показывает, что деление сигнала на первый и второй приходы условно. Между группами волн (1) и (2) находится непрерывный участок сигнала с достаточно высоким значением кросс-корреляции, явно соответствующий одному и тому же взрыву (рис. 6б). Поэтому деление сигнала на первый, второй и третий приходы, в некоторой степени, условно и сделано, по большей части, для унификации представления результатов.

Средняя кажущаяся скорость подхода волны на группу для приходов 1 и 2 – 0.34 км/сек, то есть, соответствует распространению волны вдоль земной поверхности. Для третьего прихода скорость составляет 0.37 км/сек. Таким образом, можно заключить, что сигналы от первых двух приходов распространялись в тропосфере, а от третьего, возможно, в стратосфере.

Минимальная ошибка локации составила 5 км, максимальная – 60, средняя – 24 км, среднеквадратичное отклонение 14 км, систематическая ошибка 11 км.

Ясно, что на точность локации влияет точность определения азимутов по группам.

Мы попытались определить, с какой точностью могут быть рассчитаны азимуты, и каков вклад случайных ошибок и ошибок за счет ветров.

### 6. Вариации оценок азимутов и кажущихся скоростей прихода волн на инфразвуковую группу (на примере финских взрывов)

Исследование вариаций оценок азимутов на финские военные взрывы проводили по записям 32 сигналов, зарегистрированных Апатитской группой.

Для каждого взрыва выбрали фрагмент записи, начиная с 13-й минуты после взрыва и длиной 10 минут (достаточный участок, чтобы вместить все приходы инфразвуковых волн). По фрагменту перемещались скользящим окном шириной в 10 секунд со сдвигом 5 секунд. Для каждого положения окна считали максимум кросс-корреляции и соответствующие ему значения азимута, скорости и амплитуды. Пример результата расчета кросс-корреляции показан на рис. 7.

Кросс-корреляция каналов группы считается для значений скорости с шагом 0.01 км/с и азимута с шагом  $1^\circ$ . Наиболее темный участок на рис. 7 соответствует значениям кросс-корреляции выше 0.8. Таким образом, методическая погрешность расчета азимута –  $\pm 1^\circ$ , а кажущейся скорости –  $\pm 0.01$  км/с.

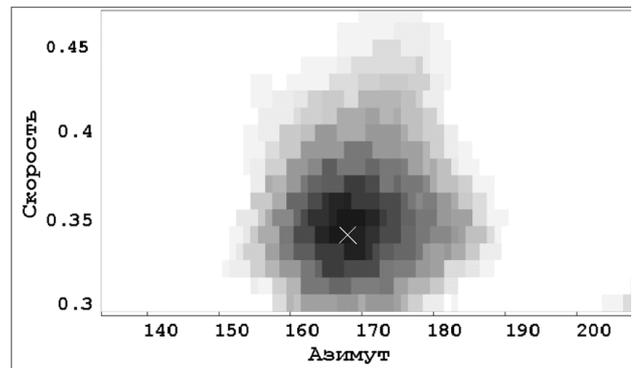


Рис. 7. Пример результата расчета азимута и скорости при фиксированном положении скользящего окна

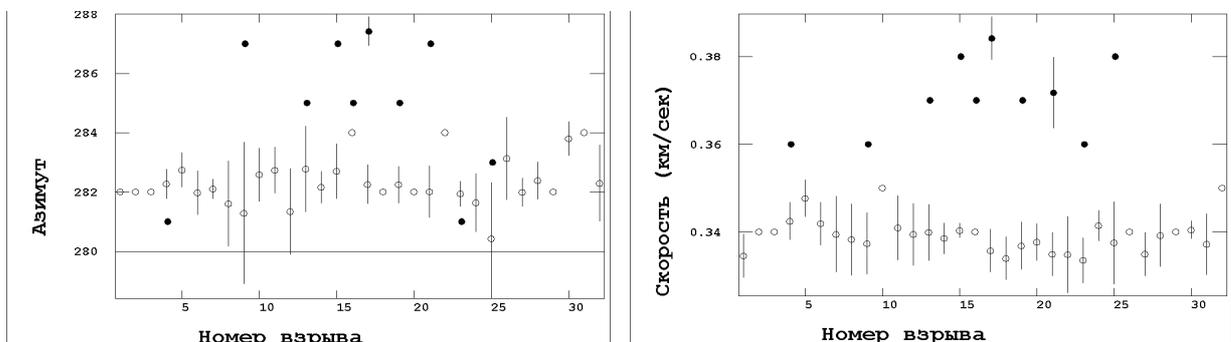


Рис. 8. Результаты оценки азимутов и кажущейся скорости для финских взрывов.

По горизонтали – порядковый номер взрыва, по вертикали – оценки азимута и кажущейся скорости для двух интервалов времени. Белые маркеры – первый сигнал (фрагмент 1-2 на рис. 6б), черные – второй (фрагмент 3 на рис. 6б). Линией показан истинный азимут –  $280^\circ$

Для каждого взрыва считались средние азимут и кажущаяся скорость для интервала времен, соответствующих первым двум приходам (которые можно рассматривать как непрерывный первый приход, см. рис. 6б) и для третьего прихода. Для усреднения использовались значения азимута при тех положениях скользящего окна, в которых максимум кросс-корреляции оказался больше 0.8, то есть окон с большой достоверностью. Результаты расчетов представлены на рис. 8.

По всем взрывам средняя оценка азимута первой группы волн оказалась  $282 \pm 1^\circ$ , а кажущейся скорости  $0.34 \pm 0.01$  км/сек, для второй –  $286 \pm 2^\circ$ , и  $0.37 \pm 0.01$  км/сек.

Истинный азимут должен быть  $280^\circ$ . Видно, что оценки азимута устойчивы, однако имеют место систематические отклонения в  $2^\circ$  для первой и  $6^\circ$  второй групп волн. Одним из возможных объяснений этого может служить влияние господствующих ветров.

### 7. Влияние метеорологических условий на распространение инфразвуковых сигналов (на примере взрывов на полигоне в Финляндии)

Повторяющиеся сигналы из одного и того же места и от практически одинаковых источников имеют большую ценность для отработки процедур локации, оценок влияния метеоусловий на особенности распространения инфразвука.

Как уже отмечалось, при регистрации сигналов от финских взрывов барографами сейсмоинфразвукового комплекса Апатиты (СИЗК) наблюдаются неоднократные приходы акустических волн от одного и того же взрыва.

Мы провели ручной поиск всех приходов инфразвуковых волн после каждого взрыва с 15 августа по 6 сентября 2007 г.

В таблице представлены статистические параметры времен пробега ( $dt$ ) и кажущихся скоростей пробега ( $v$ ) для всех трех приходов инфразвуковых волн на датчики сейсмоинфразвукового комплекса (СИЗК) Апатиты. Распределения времен пробега приходов показаны на рис. 9.

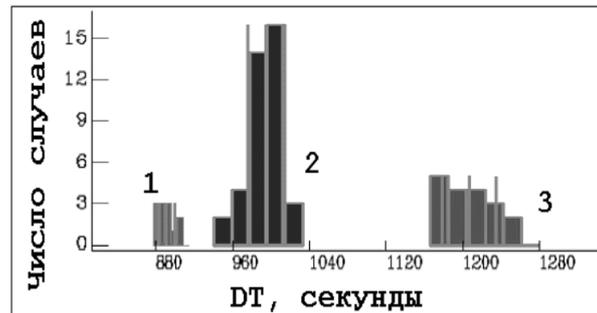


Рис. 9. Распределения времен пробега инфразвуковых волн для трех приходов

Таблица. Статистические параметры времен пробега и скоростей приходов

Тип	$N$ случаев	$dt_{\min}$ (с)	$dt_{\max}$ (с)	$dt_{\text{average}}$ (с)	$\sigma_{dt}$ (с)	$v_{\min}$ (м/с)	$v_{\max}$ (м/с)	$v_{\text{aver}}$ (м/с)	$\sigma_v$ (м/с)
$I_1$	12	878	908	891	8.4	326	337	332	3.1
$I_2$	39	941	1033	994	18	287	315	298	5.5
$I_3$	18	1166	1261	1206	28	235	254	245	5.6

Видно, что разброс значений времен пробега для первой группы волн минимален. Он может быть объяснен небольшими вариациями температуры и скорости ветра, а также погрешностями измерений времен приходов волн. Отметим, что измерение инфразвуковых времен приходов сложнее, чем сейсмических, ввиду их размытости и нечеткости. Ошибки измерения могут доходить до десятков секунд. Разброс значений времен пробега для второго и третьего приходов намного больше, возможно, ввиду изменчивости метеопараметров и, следовательно, более значительного их влияния на особенности распространения инфразвуковых волн.

Попробуем выяснить, насколько сильно влияют метеорологические параметры на факт наличия или отсутствия первого прихода акустической волны. Были выбраны метеорологические данные (<http://rp5.ru/archive.php?wmo>) одной из ближайших станций (Мончегорск) во времена, близкие к временам взрывов:  $T$  – температура на 2 м выше земной поверхности;  $p$  – атмосферное давление, приведенное к среднему уровню моря, мм рт. ст.;  $U$  – относительная влажность, %;  $Wd$  – направление ветра в градусах (пересчитано из румбов компаса);  $Wv$  – скорость ветра, м/сек;  $C$  – общее количество облаков всех ярусов, баллы от 0 до 10;  $H$  – высота нижней кромки облаков, м.

Корреляционный анализ, показал, что наибольшее влияние на отсутствие и наличие первого прихода инфразвуковых волн оказывает:  $T$  – температура,  $p$  – давление и  $C$  – общее количество облаков всех уровней.

Введем некий параметр –  $K$ . Пусть  $K_i = 0$ , если для  $i$ -го события фаза не обнаружена и  $K_i = 1$ , если обнаружена. Постараемся предсказать  $K_i$  по метеоданным ( $T, p, C$ ). Построим линейную регрессию в виде:  $K = a_0 + a_1 T + a_2 p + a_3 C$ . Подбор методом наименьших квадратов дает следующие значения коэффициентов в этой регрессии:  $a_0 = -19.2$ ,  $a_1 = 0.032$ ,  $a_2 = 0.026$ ,  $a_3 = -0.06$ .

Корреляция между истинными и рассчитанными по данной регрессии значениями  $K$ :

$$\text{Corr}(K, a_0+a_1T+a_2p+a_3C) = 0.62.$$

Высокое значение корреляции показывает, что причинно-следственная связь между погодными условиями и фактом наличия или отсутствия первой фазы действительно существует.

Введем эмпирическое правило, что если  $a_0+a_1T+a_2p+a_3C > 0.5$ , тогда первая фаза должна существовать, и наоборот.

Такое правило предсказывает наличие или отсутствие фазы в 38 случаях из 45, т.е., в 84 % случаев.

## 8. Заключение

Проведены исследования, направленные на усовершенствование методов инфразвукового контроля соблюдения Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний.

Применение созданных в КФ ГС РАН программных средств (акустический детектор – **ACD**, ассоциатор приходов и локатор акустических сигналов – **ACL**, программа просмотра кросс-корреляций и когерентностей – **BARPLOT**) позволяет:

- обнаруживать события, генерирующие инфразвук, определять места проведения взрывов и других проявлений техногенной активности (при условии существования сети инфразвуковых групп);
- выделять сигналы, приходящие на разные сейсмоакустические группы, которые соответствуют одним и тем же сейсмическим событиям;
- проводить интерактивный анализ вариаций азимутов и скоростей акустических волн, соответственно.

С помощью программы **ACL** выявлено несколько событий, произошедших в районе космодрома Плесецк, причем информации о событиях в средствах массовой информации не было.

В настоящее время в КФ ГС РАН собрано около десятка записей, соответствующих пускам ракет с космодрома Плесецк. Также имеются записи инфразвуковых событий, произошедших в дни пусков ракет "Булава" и "Синева" с акваторий Белого и Баренцевого морей.

На примере повторяющихся взрывов, которые производили финские военные (близкие по форме сигналы, приходящие из определенного, известного, места) проведен анализ вариаций оценок азимутов и кажущихся скоростей приходов звуковых волн на датчики Апатитской группы. Были обнаружены систематические ошибки определения азимутов, связанные, возможно, с преобладающими ветрами.

Оценены погрешности локации финских взрывов по сети инфразвуковых групп региона. Минимальная ошибка локации составила 5 км, максимальная – 60, средняя – 24 км. Для уточнения локации понадобится учет упомянутых выше систематических ошибок.

Показано, что связь между погодными условиями и фактом наличия или отсутствия первого прихода инфразвуковой волны действительно существует.

**Благодарности.** Мы выражаем благодарность коллективу шведского Института космической физики за отличные данные. Мы благодарим доктора Pär-Ola Nilsson (Umeå) и доктора Tormod Kvaerna (NORSAR) за помощь в доступе к этим данным.

## Литература

- Ringdal F., Kvaerna T.** A multi-channel processing approach to real time network detection, phase association, and threshold monitoring. *Bull. Seism. Soc. Am.*, v.79, 1990.
- Асминг В.Э.** Программный комплекс для автоматизированной обработки сейсмических записей "EL". В сб.: *Приборы и методика геофизического эксперимента. Мурманск, ООО "МИП-999"*, с.125-132, 1997.
- Асминг В.Э., Виноградов Ю.А., Евтюгина З.А.** Эксперимент по ассоциации фаз и локации акустических событий. *Материалы Международной научно-технической конференции "Наука и образование – 2008"*, Мурманск, электронный текст ФГОУВП "МГТУ", НТЦ "Информрегистр" 0320800238, с.256-259, 2008а.
- 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*, т.11, № 3, с.512-518, 2008б.