

УДК 550.34.034(470.21)

О результатах наблюдений на Апатитском сейсмо-инфразвуковом комплексе

В.Э. Асминг¹, Ю.А. Виноградов¹, З.А. Евтюгина^{1,2}, Е.О. Кременецкая¹,
А.В. Прокудина¹

¹ Кольский филиал геофизической службы РАН, Апатиты

² Апатитский филиал МГТУ, кафедра геоэкологии

Аннотация. Был произведен анализ инфразвуковых сигналов, принимаемых сейсмо-инфразвуковым комплексом (СИЗК) "Апатиты". Данные обрабатывали с помощью специально созданной программы – автоматического детектора инфразвуковых "событий". Детектирование инфразвуковых событий в диапазоне 0.02-0.5 Гц невозможно при нашей конфигурации веерных фильтров, потому что в области самых низких частот датчики пищут, в основном, ветровые помехи. События, обнаруживаемые в разных полосах частот, имеют разную природу: в полосе 0.5-2 Гц – в основном, естественные события (микробаромы); 5-20 Гц – выделяются близкие сигналы, в том числе от пролетающих самолетов (эффект Доплера). В полосе частот 1-5 Гц СИЗК "Апатиты" способен регистрировать сигналы от открытых взрывов на больших расстояниях (свыше 1700 км) от г. Апатиты.

Abstract. The analysis of events recorded by the Apatity infrasound array has been carried out. The events have been found by an automatic detection program. It has been shown that the detection of events in the frequency band 0.02-0.5 Hz is impossible due to huge wind noise for our configuration of fan pipe filters. The events detected in different frequency bands are of different nature. Mostly natural events (microbaromes) can be detected in 0.5-2 Hz band. Mostly human-made events are detected in 1-5 Hz band including signals of mining explosions at large distances (up to 1700 km). Near events including planes passing in the vicinity (Doppler effects) can be detected in 5-20 Hz frequency band.

1. Введение

Среда, окружающая человека, наполнена инфразвуком. Любой регион планеты имеет свой инфразвуковой фон, который формируется различными природными явлениями, генерирующими акустические волны (извержения вулканов, штормы, ветры), а также искусственными источниками низкочастотных колебаний: транспорт, технологическое оборудование, промышленные взрывы (Рий, 1974; Гостинцев и др., 1985; Орлов, Уралов, 1984). Инфразвуковые волны могут распространяться на большие расстояния (Воробьев и др., 1986). Результаты изучения особенностей распространения инфразвука в атмосфере в дальнейшем позволят применить акустический метод для решения определенных прикладных задач. Так, например, Кольский филиал геофизической службы Российской академии наук (КФ ГС РАН) в г. Апатиты выполнял работы по проекту Международного научно-технического центра (<http://www.ISTC.RU>) – "Исследование характеристик инфразвукового фона для оценки пороговой чувствительности инфразвукового метода контроля над проведением ядерных испытаний".

2. Структура сейсмо-инфразвукового комплекса "Апатиты"

В центре Кольского полуострова, в 18 км от города Апатиты, близ озера Имандра расположен сейсмо-инфразвуковой комплекс (СИЗК) "Апатиты". Сейсмическая группа комплекса состоит из 9 сейсмометров и трехкомпонентной сейсмической станции. Сейсмодатчики располагаются на двух концентрических окружностях. На малом круге Апатитской сейсмической группы, в непосредственной близости от сейсмических датчиков, размещены три микробарографа фирмы SHAPPAREL V. Каждый микробарограф подключен к так называемому веерному фильтру, т.е. системе пластмассовых трубок длиной до 30 м, подавляющей ветровые помехи (рис. 1).

Данные микробарографов и сейсмических датчиков оцифровываются с помощью АЦП RD-6 фирмы Nanometrics с частотой оцифровки 40 Гц и передаются по радио в Апатиты для дальнейшей обработки.

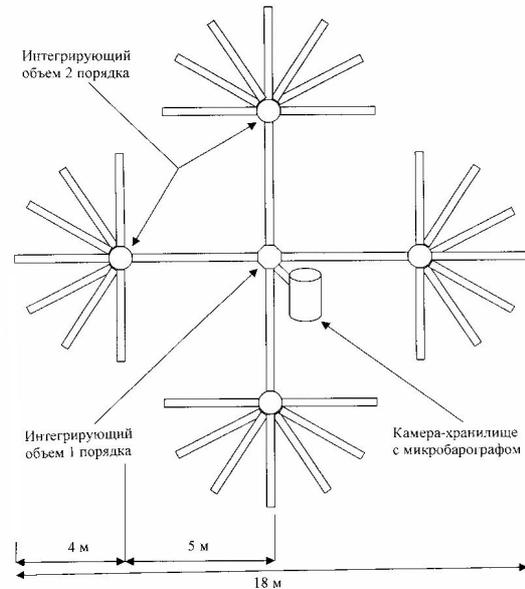
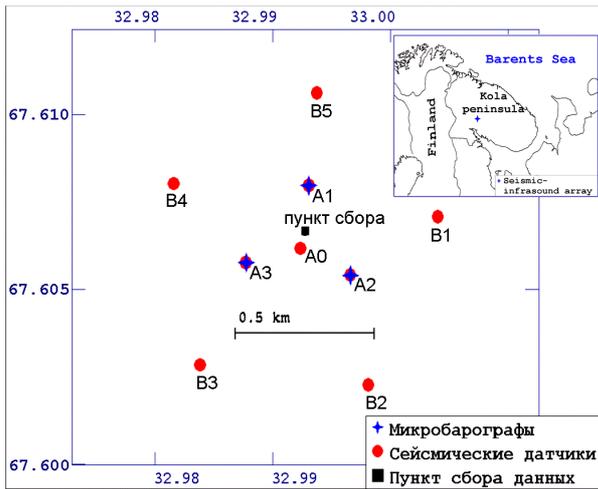


Рис. 1. Конфигурация СИЗК "Апатиты"

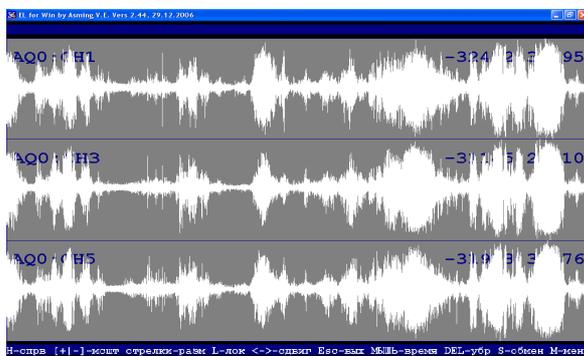
3. Анализ работы детектора инфразвуковых сигналов ACD

В КФ ГС РАН разработана программа ACD – автоматический детектор инфразвуковых событий. Под "инфразвуковым событием" мы понимаем приход на датчики группы когерентных (близких по форме) сигналов со сдвигами во времени, т.е. порожденных фронтом одной и той же волны. В результате детектирования формируется набор файлов, содержащих записи акустических событий. Они связываются с базой данных, содержащей времена, азимуты и когерентности каналов найденных событий. Чтобы установить чувствительность детектора в различных полосах частот и оценить предельное расстояние, на котором СИЗК ощущает акустические события, а также понять, каковы источники инфразвуковых событий, необходимо проанализировать распределения найденных событий по времени и направлению прихода в зависимости от полосы частот, в которой они выделяются.

Начали мы с оценки возможности детектирования в области самых низких частот (до 0.5 Гц). Данные с 1 по 10 января и с 1 по 10 июня 2004 г. были подвергнуты процедуре ресемплинга (изменения шага дискретизации) с 0.025 сек до 1 сек. Процедура заключалась в применении антиалиасингового фильтра, убирающего частоты выше 0.5 Гц, и взятии каждого 40-го отсчета. Результаты показаны на рис. 2.

Общая картина поведения сигнала на всех трех датчиках очень похожа. Однако если рассматривать данные в более крупном масштабе, окажется, что записи совершенно некоррелированы (рис. 3). Попытка рассчитать кажущуюся скорость по похожим участкам данных дает скорость 0.005 км/сек, вместо ожидавшейся скорости звука 0.33 км/сек.

Необходимо было выяснить, что же, собственно, регистрируют микробарографы в низких частотах? Для этого данные метеостанции Апатиты (<http://meteo.infospace.ru/>) – атмосферное давление, скорость ветра – сравнивали (визуально) с данными микробарографов, а именно, со средней амплитудой сигнала на одном из микробарографов. Выявлено, что изменения скорости ветра и средней амплитуды сигнала происходят почти синхронно: видна высокая степень корреляции параметров (рис. 4).



а) Данные с 1 по 10 января 2004 года



б) Данные с 1 по 10 июня 2004 года

Рис. 2. Записи микробарографов, приведенные к шагу дискретизации 1 сек.

Рис. 3. Фрагмент записи за июнь 2004 г. в крупном масштабе (показано 30 минут записи)

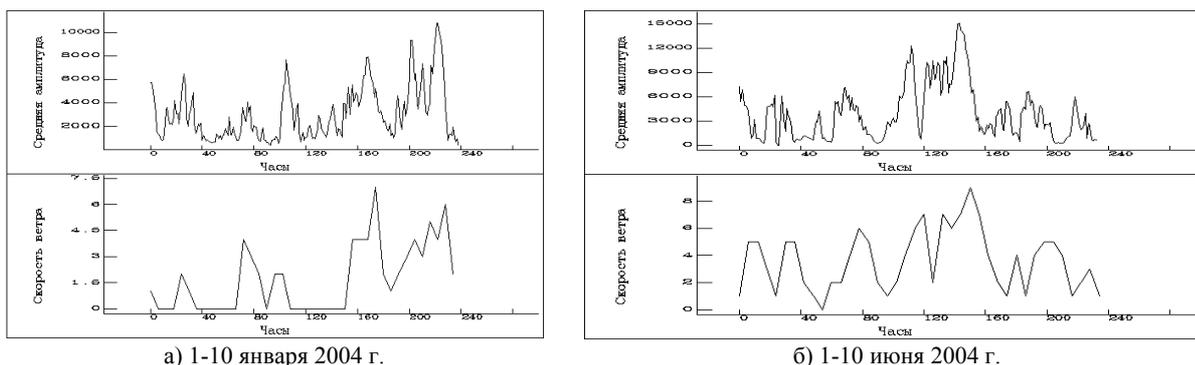
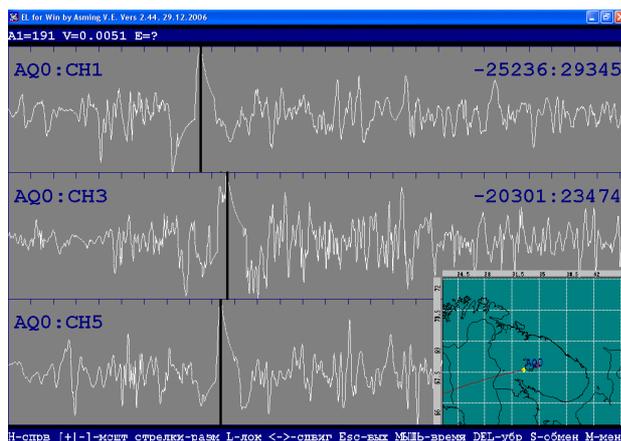


Рис. 4. Изменения в течение первых декад января и июня 2004 г. скорости ветра (метеостанция Апатиты, шаг данных – 6 часов) и средней амплитуды по одному из датчиков (время усреднения – 1 час)

Можно небезосновательно предположить, что в низких частотах датчики пишут в основном ветровые помехи. Поэтому, обнаружение когерентных сигналов низкой частоты (ниже 0.5 Гц) маловероятно при существующей конфигурации веерных фильтров.

Далее проведено сравнение результатов детектирования для различных частотных полос – 0.5-2 Гц, 1-5 Гц, 5-20 Гц. В качестве исходных были взяты данные за один месяц – февраль 2006 г. Порог детектора по когерентности – 0.7, по отношению сигнал/шум (signal-to-noise ratio – SNR) – 3. Окно расчета когерентности – 1 сек для полос 1-5 Гц и 5-20 Гц и 5 сек для полосы 0.5-2 Гц.

Полоса 0.5-2 Гц

Обнаружено 573 события (результаты детектирования – на рис. 5А). Ложных срабатываний детектора не замечено. Среднее отношение сигнал/шум равно 6, медиана 3.2. Гистограммы распределения событий по дням недели и по азимутам показывают, что явной зависимости числа событий от дня недели не наблюдается. Это позволяет предположить, что большинство событий имеют естественную природу, причем большинство как слабых, так и сильных событий приходят с северо-западного направления.

Полоса 1-5 Гц

Обнаружено 307 реальных событий, 44 раза произошли ложные срабатывания детектора. Среднее отношение сигнал/шум составило 17.8, медиана – 6. Гистограммы распределения событий по дням недели и по азимутам показаны на рис. 5Б. Видна явная зависимость числа событий от дней недели, резкое уменьшение их числа в выходные. Это делает очевидным техногенное происхождение большинства из них. Наиболее часто сигналы приходят с южного направления. Для сильных событий добавляются характерные группы приходов с азимутами около 0° и 90°, соответствующие карьерным взрывам на рудниках в Хибинах и Оленегорске.

Полоса 5-20 Гц

Обнаружено 93 события, 23 из них оказались сигналами, соответствующими записи эффекта Доплера от пролетающих в районе СИЗК самолетов (рис. 6). Ложных срабатываний детектора не отмечено. Среднее отношение сигнал/шум составило 14.8, медиана 5. Гистограммы распределения событий по дням недели и по азимутам показаны на рис. 5В.

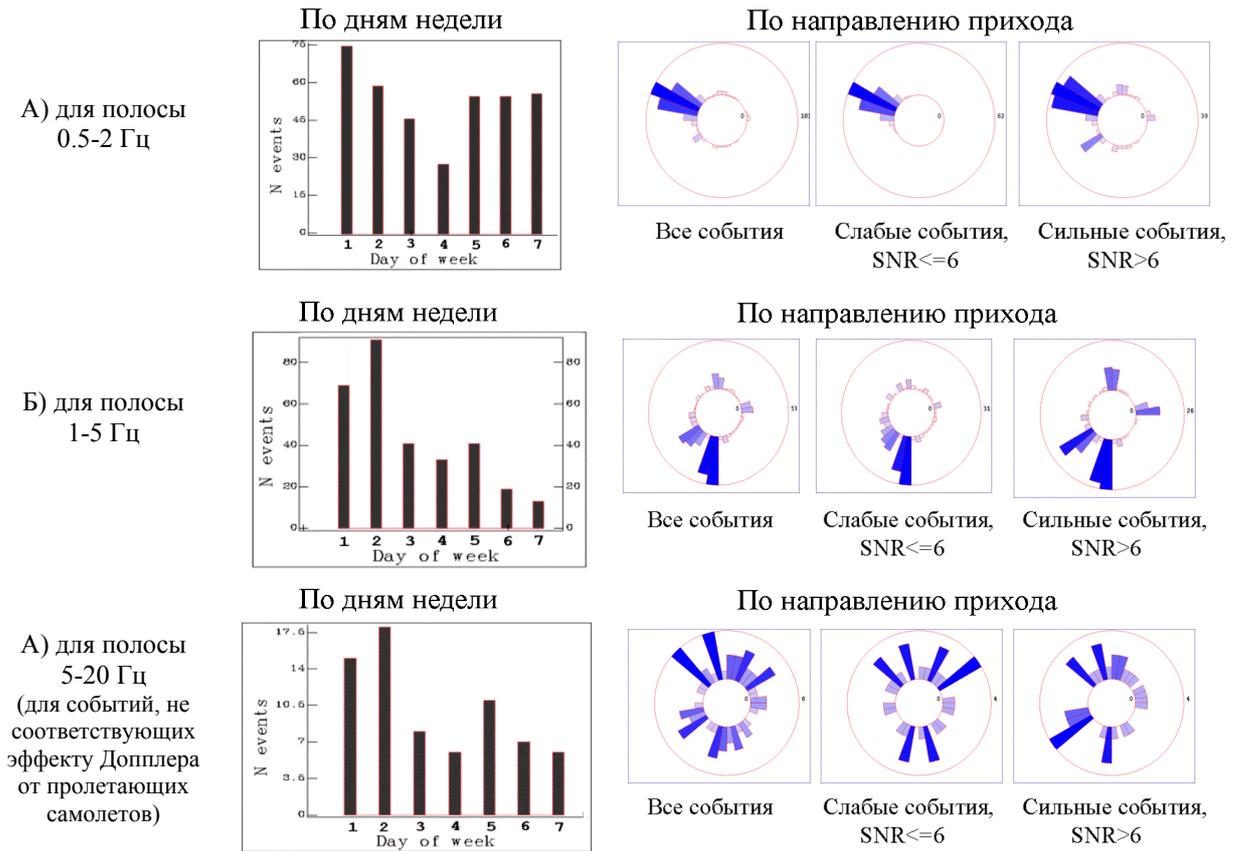


Рис. 5. Результаты детектирования

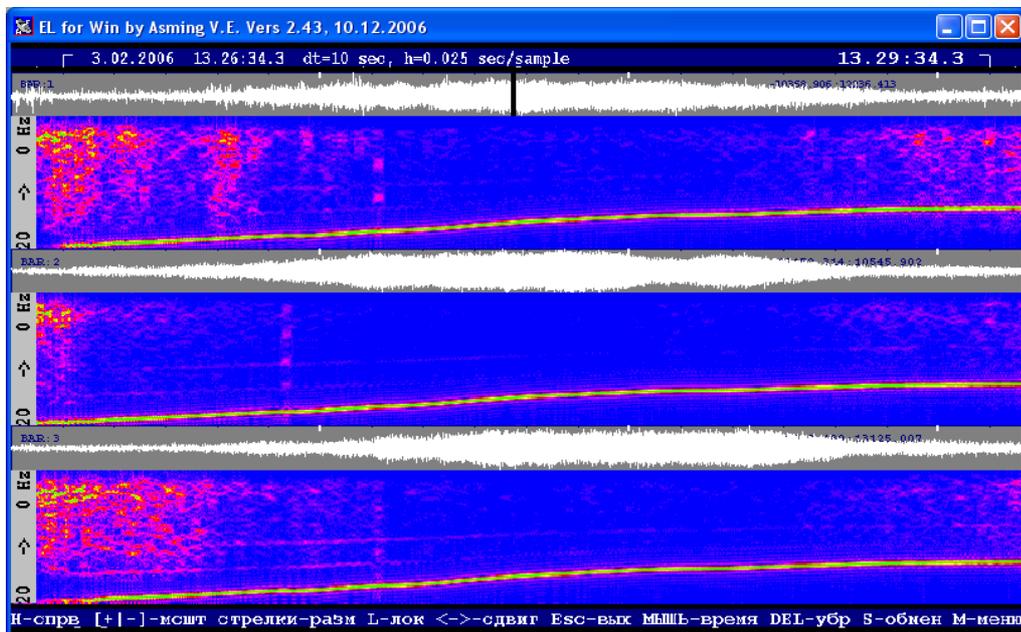


Рис. 6. Запись и сонограмма сигнала, соответствующего эффекту Доплера от пролетающего самолета. Видно плавное уменьшение основной частоты сигнала с течением времени

Как и в полосе 1-5 Гц, заметна существенная зависимость числа событий от дней недели – уменьшение числа событий в выходные. Очевидно, большинство событий имеют техногенную природу. Интересно, что, в отличие от прочих диапазонов частот, не заметно выраженных направлений, с которых приходят сигналы.

4. Обнаружение сигналов от взрывов на Курской Магнитной Аномалии (КМА)

15.02.2006 г. в 09:00:09 GMT на одном из рудников КМА произошел сильный взрыв, сигнал от которого был зарегистрирован инфразвуковой группой I31 в Казахстане, входящей в международную систему мониторинга Договора о всеобщем запрещении ядерных испытаний (IMS). Ориентировочные координаты взрыва 52.13N 35.66E (рис. 7).

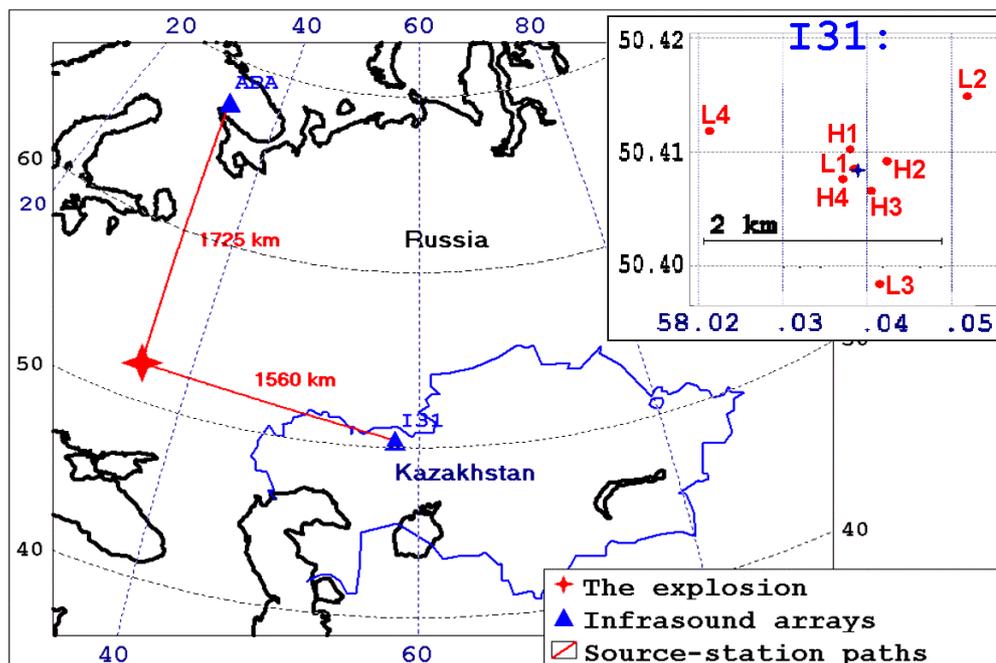


Рис. 7. Взрыв на КМА и пути распространения волны до СИЗК Апатиты и I31 (Казахстан).
На врезке – расположение датчиков станции I31.

Мы решили выяснить, как работает детектор ACD на данных станции I31, и проверить зарегистрирован ли этот взрыв СИЗК Апатиты. Данные станции I31 были любезно предоставлены сотрудницей Национального центра данных Казахстана З. Синёвой. Расположение датчиков станции I31 показано на врезке рис. 7.

Время пробега волны до Апатитов (1725 км) для скоростей 0.2-0.33 км/сек составляет от 1 часа 27 минут до 2 часов 33 минут, азимут 173°. Для станции в Казахстане (1560 км) время пробега должно быть в диапазоне от 1 часа 19 минут до 2 часов 10 минут, азимут – 287°. Для станции I31 (Казахстан) мы провели детектирование в двух вариантах: первый – по всем датчикам станции; второй – по датчикам центральной подгруппы. Детектирование проводилось в полосе частот 1-5 Гц. В первом случае было обнаружено одно событие: время – 10.40:27; когерентность – 0.6; сигнал/шум – 5; азимут – 283°. Запись представлена на рис. 8.

Во втором случае (детектирование по центральной подгруппе I31 малой апертуры) было обнаружено три события, включая и найденное в предыдущем случае, но с лучшими значениями когерентности и отношения сигнал/шум:

Время	Когерентность	Сигнал/Шум	Азимут
10.36:02	0.5	2.8	294
10.38:00	0.6	4.5	291
10.40:27	0.8	5.7	284

Очень интересно, что детектирование по более компактной центральной подгруппе оказалось лучше, чем по всей группе. Причина в том, что когерентность сигналов на сильно разнесенных датчиках существенно ниже, чем на датчиках, более близких друг к другу. Записи обнаруженных событий показаны на рис. 9.

Данные СИЗК "Апатиты" за 15.02.2006 г., период времени с 10.00 по 12.00 GMT, были обработаны детектором. Обнаружено 28 событий, из которых только одно – с азимута, соответствующего искомому взрыву на КМА. Параметры события:

Время	Когерентность	Сигнал/Шум	Азимут
10.39:59	0.8	3.3	168

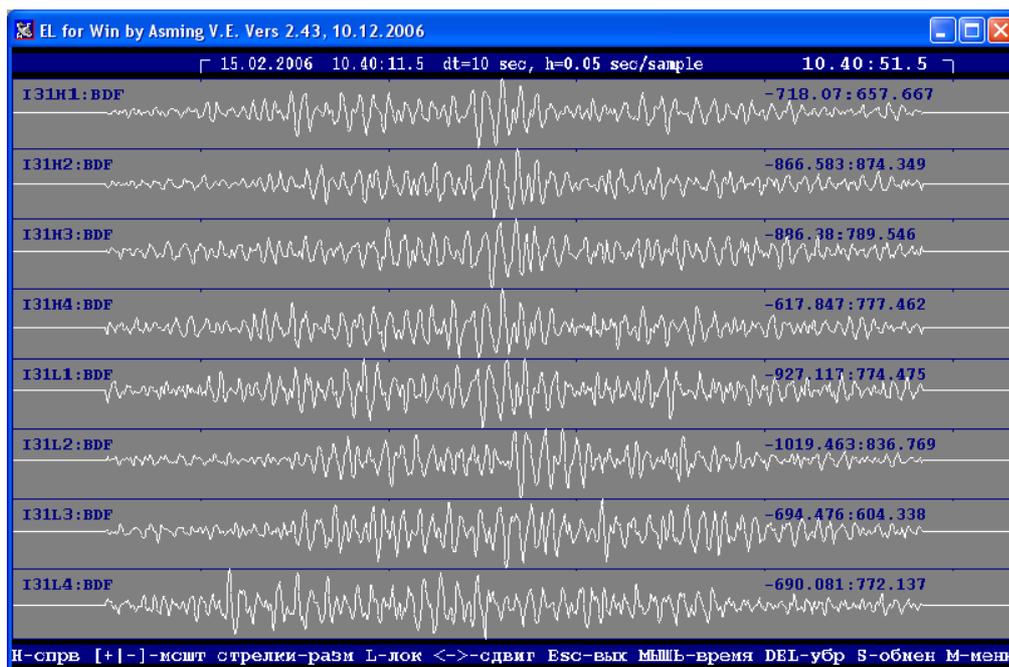


Рис. 8. Событие, обнаруженное при использовании всех датчиков I31 для детектирования

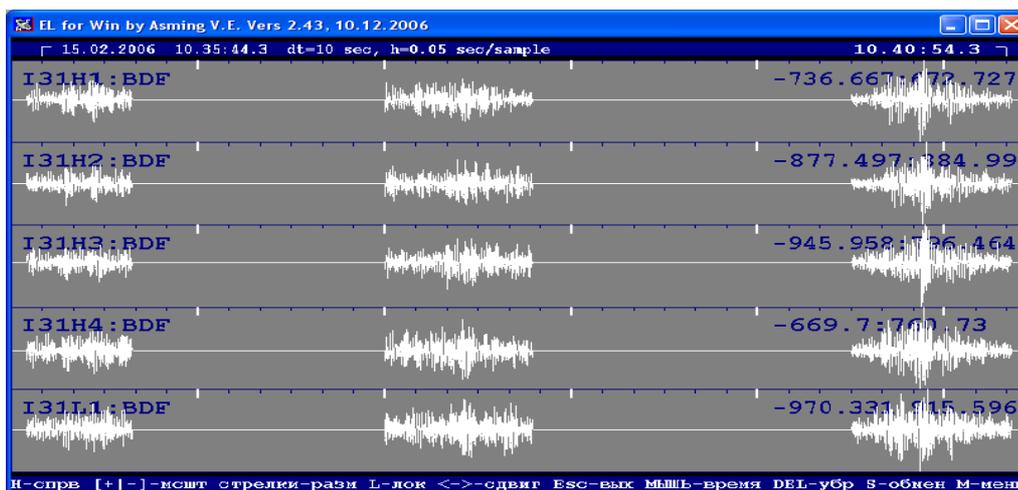


Рис. 9. События, обнаруженные с использованием центральной подгруппы I31

Таким образом, можно с большой степенью уверенности заключить, что обнаруженное событие соответствует взрыву на КМА. Однако доказать это абсолютно точно невозможно – на пути длиной в 1700 км может существовать и много других источников инфразвуковых сигналов. Тем не менее, можно статистически проверить, возможна ли регистрация таких взрывов. Мы попытались обнаружить сигналы от 25 взрывов, произошедших в период с 2002 по 2006 гг. на руднике в Железногорске (КМА). Координаты рудника 52.311 N, 35.423 E, ожидаемый азимут 174°, время пробега от 1 часа 27 минут до 2 часов 23 минут.

В результате детектирования было найдено 7 сигналов, которые, возможно, соответствуют некоторым из 25-ти взрывов.

Дата	Время	Азимут	Когерентность	Сигнал/Шум
19.04.02	09.58:45	174	0.90	4
27.12.02	10.50:28	165	0.80	4.6
23.04.04	09.42:40	170	0.86	3.8
02.03.05	10.57:41	170	0.89	33
01.06.05	09.25:03	173	0.76	4.6
13.01.06	10.53:00	174	0.88	6.9
15.02.06	10.39:59	168	0.79	3.3

Конечно, нельзя однозначно утверждать, что все срабатывания детектора вызваны именно взрывами на КМА, однако сходство параметров результатов детектирования показывает, что такое предположение имеет серьезные основания.

5. Заключение

Анализ результатов работы автоматического детектора акустических событий АСД показал, что события, обнаруживаемые в разных полосах частот, имеют разную природу. В полосе 0.5-2 Гц обнаруживаются в основном естественные события, на более высоких частотах – техногенные события. Сигналы от пролетающих самолетов (эффект Допплера) выделяются в полосе 5-20 Гц. В области самых низких частот (0.02-0.5 Гц) датчики "пишут", главным образом, ветровые помехи. Детектирование инфразвуковых событий в этом диапазоне маловероятно при нашей конфигурации веерных фильтров.

Сейсмо-инфразвуковой комплекс (СИЗК) "Апатиты" способен регистрировать сигналы от открытых взрывов на больших расстояниях (свыше 1700 км от г. Апатиты) в полосе частот 1-5 Гц.

На примере регистрации взрыва на КМА станцией I31 (Казахстан) показано, что применение инфразвуковых групп большой апертуры может не улучшать, а ухудшать детектирование ввиду меньшей когерентности сигналов на разнесенных датчиках.

Количество ложных срабатываний детектора много меньше количества реальных инфразвуковых событий, выделяемых им. Это значит, что в целях статистического анализа событий можно пользоваться результатами детектирования без ручной отбраковки ложных срабатываний.

Литература

- 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. *М., Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*, вып.75, с.189-200, 1986.
- Гостинцев Ю.А., Иванов Е.А., Куличков С.Н.** О механизме генерации инфразвуковых волн в атмосфере большими пожарами. *Докл. АН СССР*, т.283, № 3, с.573-576, 1985.
- Орлов В.В., Уралов А.М.** Реакция атмосферы на слабый наземный взрыв. *Известия АН. Физика атмосферы и океана*, т.20, № 6, с.476-483, 1984.
- Рий Д.В.** Воздушная звуковая волна при подземных взрывах. В кн.: *Подводные и подземные взрывы. Под ред. В.Н. Николаевского. М., Мир*, с.393-413, 1974.