

УДК 551.594.21(571.66)

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ СВИСТЯЩИХ АТМОСФЕРИКОВ

*Агранат И.В.*

*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН  
пос. Паратунка Камчатского края*

*Научный руководитель: к.ф.-м.н. Чернева Н.В.*

Свистящие атмосферерики (свистовые волны, вистлеры) — это вид естественного ОНЧ излучения. Такие атмосферерики возникают в результате излучения молниевых разрядов. В том случае, если разряд распространяется через ионосферу вдоль силовой линии магнитного поля Земли, можно говорить о нем как о свистящем атмосферерике. Исследование свистящих атмосферерикиков имеет большое значение для глубокого и подробного изучения грозового процесса, для выявления новых связей между явлениями и процессами в ионосфере и магнитосфере. В качестве прикладных задач в изучении свистящих атмосферерикиков можно выделить следующие направления исследования: определение электронной концентрации в ионосфере, изучение результатов естественного и антропогенного воздействия на верхние слои атмосферы. Для решения задач такого рода необходимо ведение долговременной статистики свистящих атмосферерикиков, что невозможно без системы автоматического детектирования. Но задача детектирования, в данном случае, имеет свои особенности: полезный сигнал неразличим на волновой форме представления, поэтому интерес представляют, преимущественно, спектрограммы сигнала. Другая особенность заключается в том, что для ряда методов распознавания необходим идеальный сигнал, свободный от помех. Следовательно, возникает необходимость создания имитации сигнала, которая будет служить эталоном при детектировании. В докладе освещается разработанная в ИКИР ДВО РАН система автоматического детектирования свистящих атмосферерикиков. Работа детектора в данной системе основывается на двумерной корреляции спектра исходного сигнала и спектра сигнала-эталона, процесс создания которого также описывается в докладе. Приведены промежуточные результаты по оценке качества работы системы автоматического детектирования свистящих атмосферерикиков.

*Ключевые слова: ионосфера, грозовые разряды, свистящие атмосферерики, AWDAnet, корреляционный анализ, спектрально-временной анализ.*

## СВИСТЯЩИЕ АТМОСФЕРИКИ — ПРИРОДА ЯВЛЕНИЯ, НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Свистовые волны (свистящие атмосферерики, вистлеры) представляют собой вид естественного ОНЧ излучения атмосферного происхождения.

Вистлер образуется при распространении импульсного излучения грозового разряда вдоль силовой геомагнитной линии Земли после

прохождения через ионосферу. Волна уходит далеко в магнитосферу и возвращается к земле в магнитно-сопряженную точку, где на уровне земли она может быть зарегистрирована [1-3]. Частотные компоненты первоначального импульса распространяются с различными скоростями и приходят в точку приёма в разные моменты времени (рис. 1). Иногда вистлер, придя на дальний конец силовой линии, отражается от земной поверхности и, претерпев двойную дисперсию, возвращается в то же место, откуда он вышел.

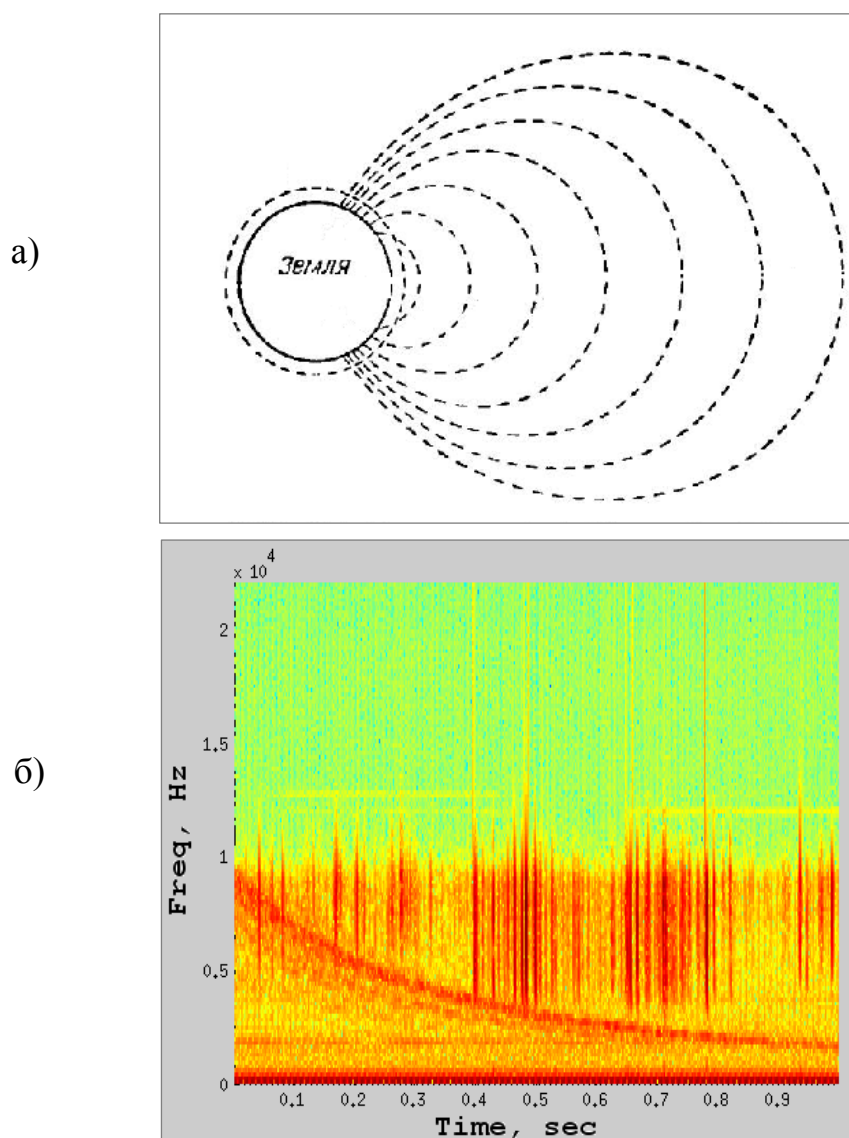


Рис. 1. а - траектория движения свистящего атмосферика;  
б - спектрограмма сигнала.

Прием свистящих атмосфериков в ИКИР ДВО РАН осуществляется при помощи ОНЧ-пеленгатора, разработанного и изготовленного сотрудниками института (рис.2). После предобработки (усиление, фильтрация, оцифровка), сигнал в виде wav-файлов записывается на жесткий диск компьютера. Регистрация ведется непрерывно. На слух вистлеры, записанные в таком формате, воспринимаются как свист с понижающейся частотой (с этим и связано название «свистящие атмосферики»).

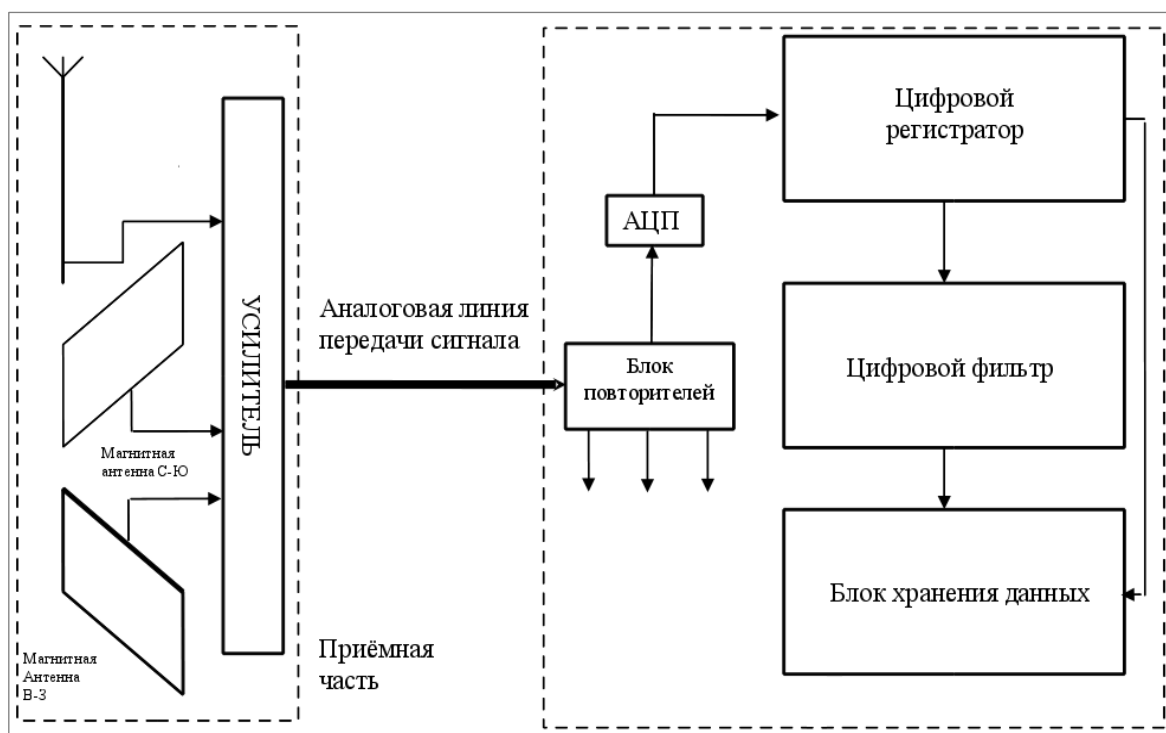


Рис. 2. Структурная схема пеленгатора

Исследование свистящих атмосфериков имеет большое значение для глубокого и подробного изучения грозового процесса, для выявления новых связей между явлениями и процессами в ионосфере и магнитосфере. В качестве прикладных задач в изучении свистящих атмосфериков можно выделить следующие направления исследования: определение электронной концентрации в ионосфере, изучение последствий естественного и антропогенного воздействия на верхние слои атмосферы [4].

Для решения задач такого рода необходимо ведение долговременной

статистики свистящих атмосфериков, то есть частоты их появления, что потребовало бы многих часов операторской работы. Таким образом, возникает необходимость создания системы автоматического детектирования.

Более подробное изучение предмета позволяет обнаружить, что построение такой системы связано с определенными трудностями:

1) Свистящий атмосферик ясно различим только на динамическом спектре сигнала, волновая форма сигнала содержит большое число помех, коротких ОНЧ импульсов, вследствие чего полезный сигнал (вистлер) на ней неразличим.

2) В качестве характеристик вистлера может выступать занимаемый им диапазон (полезный диапазон), характер зависимости частоты от времени, а так же носовая частота (рис. 3). В пределах одного пункта наблюдения полезный диапазон сохраняется, зависимость частоты от времени, носовая частота разных вистлеров имеют незначительные отличия. Однако эти параметры зависят от расположения пункта наблюдения (его широты), и поэтому получение этих характеристик требует отдельного исследования.

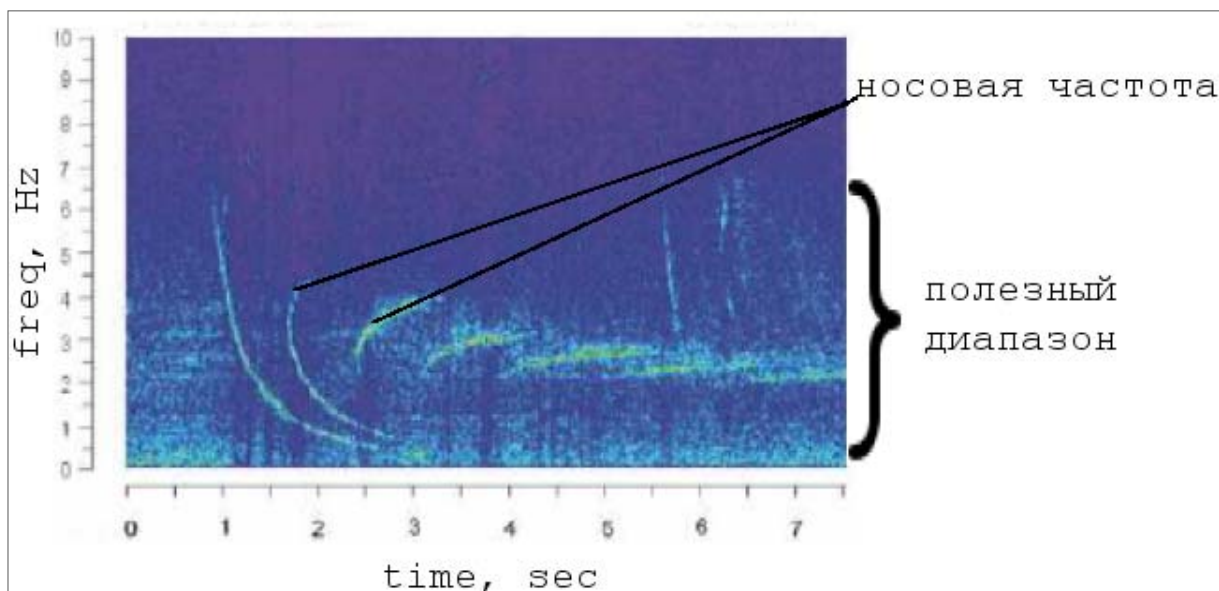


Рис. 3. Характеристики свистящего атмосферика.

3) Задача создания системы автоматического детектирования свистящих атмосфериков включает в себя синтез идеального сигнала, который будет служить эталоном при распознавании вистлеров в реальном сигнале.

Таким образом, при построении системы автоматического детектирования свистящих атмосфериков необходимо учитывать указанные выше особенности.

### ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ СВИСТЯЩИХ АТМОСФЕРИКОВ

Необходимо отметить, что имеющаяся аппаратура не позволяет регистрировать носовую частоту, но полезный диапазон, в котором лежит вистлер, для данного пункта наблюдения представляет собой полосу от 2.5 до 7 кГц. Этот диапазон удобен тем, что он содержит в себе вистлер и в тоже время является наименее зашумленным (рис. 4).

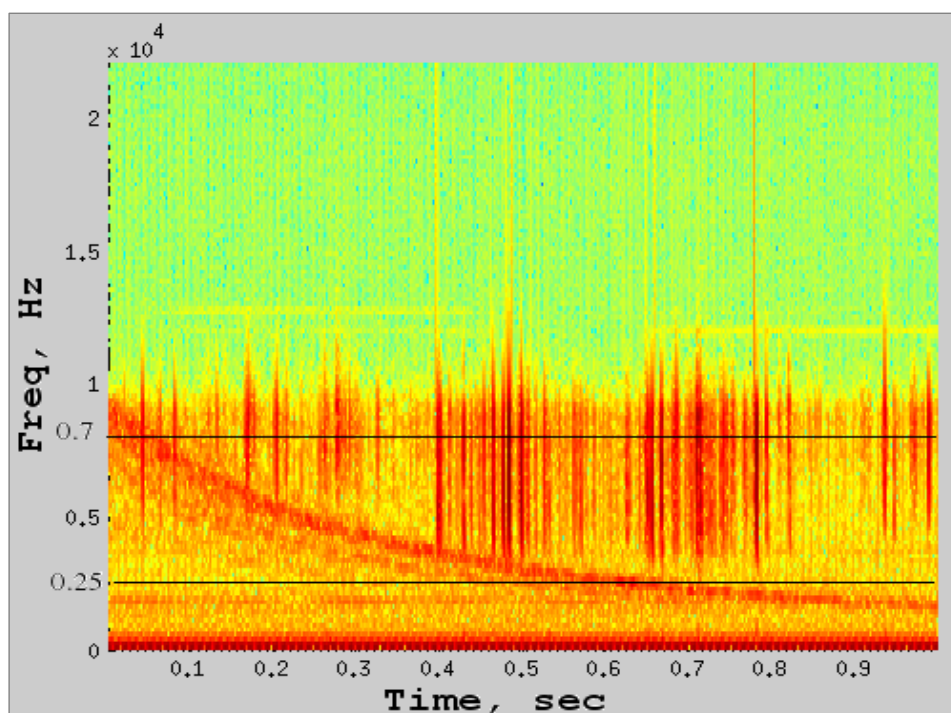


Рис. 4. Полезный диапазон 2.5 - 7 кГц

Для построения идеального сигнала были выбраны методы СВАН как наиболее простые, и в то же время позволяющие получить желаемый результат.

Моделирования свистящего атмосферика представляет собой процесс, состоящий из нескольких этапов.

1) Спектр вистлера в текущий момент времени представляет собой пик (рис.5). На данном шаге выполняется аппроксимация пика функцией, соответствующей плотности нормального распределения

$$e^{\frac{-(f-\bar{f})^2}{2s^2}}, (1)$$

$$\bar{f} = \frac{\sum f \cdot A}{\sum A}, (2)$$

где  $f$  — текущее значение частоты,  $\bar{f}$  — центр тяжести графика,  $A$  — текущая амплитуда.

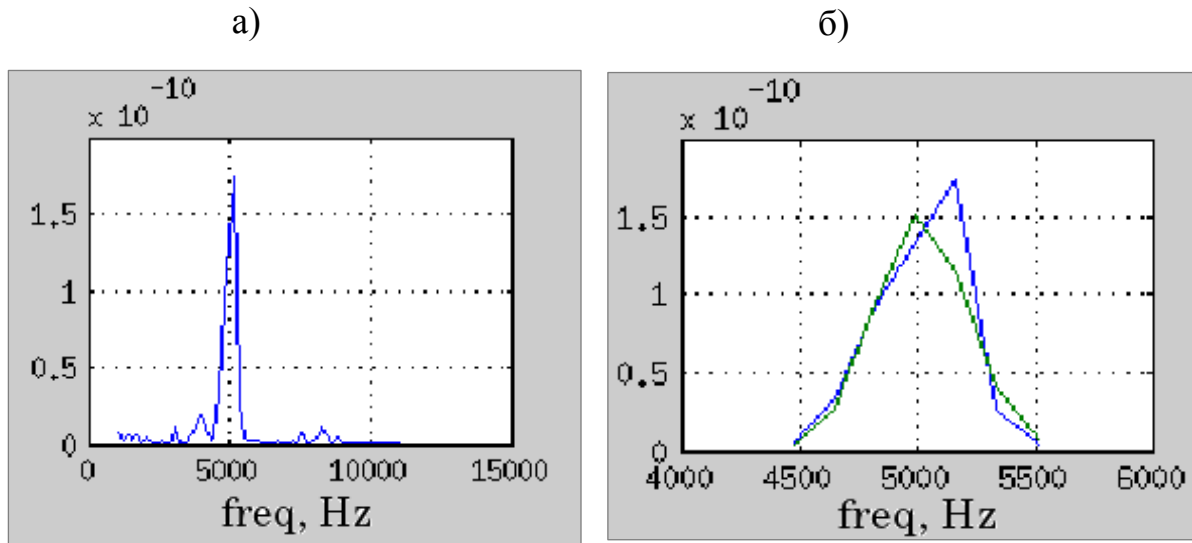


Рис. 5. Аппроксимация «пика» в спектре атмосферика в текущий момент времени  
а) обнаружение пика; б) аппроксимация.

2) Для каждого момента времени вычисляется центр тяжести (2). Вектор из полученных значений представляет собой искомую зависимость частоты от времени, возникающую вследствие дисперсии. На данном шаге выполняется аппроксимация этих данных экспоненциальной функцией (рис. 6).

3) Выполняется построение идеальной спектрограммы по вычисленным в п. 1-2 коэффициентам.

4) Выполняется обратное преобразование Фурье полученного спектра.

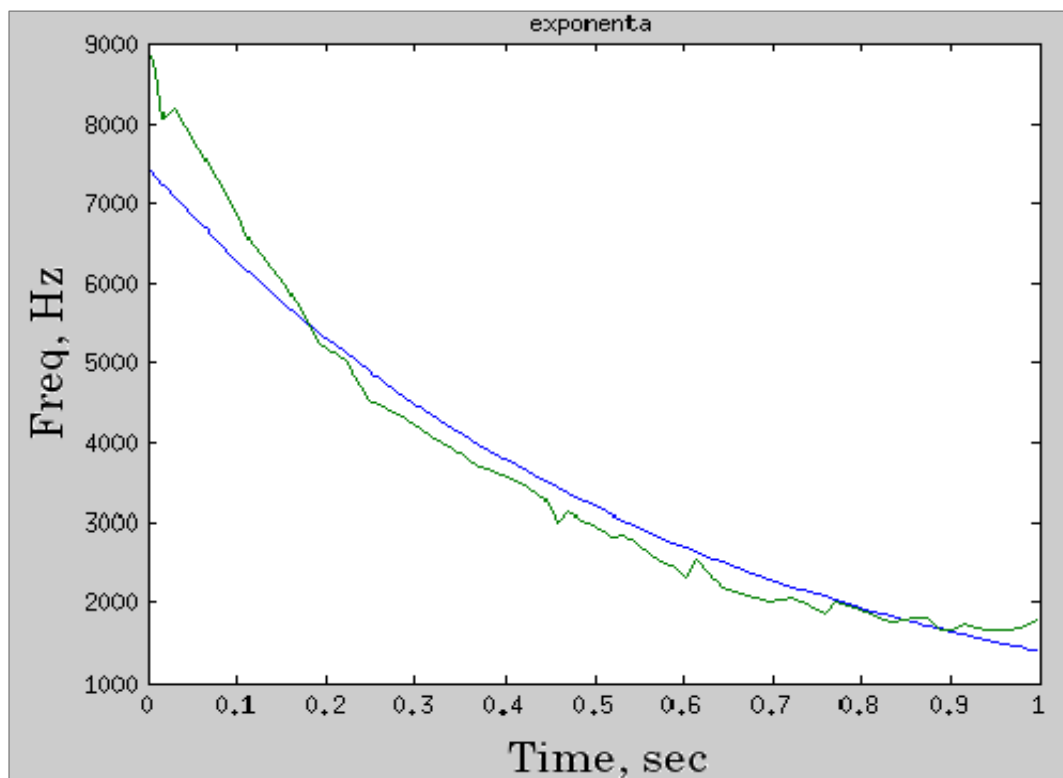


Рис. 6. Аппроксимация частотно-временной зависимости свистящего атмосферика экспоненциальной функцией.

В результате был получен сигнал, в спектре которого прослеживается искомая форма зависимости частоты от времени (рис. 7). Однако, на частоте 15 кГц проявился краевой эффект — следствие использования преобразования Фурье. Но поскольку диапазон, выбранный в качестве полезного, ограничен сверху частотой 7 кГц, то влиянием краевого эффекта можно пренебречь.

Определенные экспериментально и рассчитанные характеристики свистовых волн — полезный диапазон, характер частотной зависимости — позволяют переходить непосредственно к построению системы автоматического детектирования свистящих атмосфериков.

Задача детектирования (распознавания) свистящих атмосфериков может решаться такими методами, как нейронные сети, вейвлет-преобразование, согласованное преследование, корреляционный анализ и др. В настоящем исследовании описывается метод, основанный на двумер-

ной корреляции спектрограммы реального свистящего атмосферика со спектрограммой смоделированного сигнала. Данный метод был выбран по следующим соображениям:

- 1) Метод, основанный на корреляции, достаточно прост в применении (по сравнению, например, с нейронными сетями, где необходимо длительное обучение сети на большом количестве образцов).
- 2) Данный метод детектирования свистящих атмосфериков был предложен основателем сети автоматического определения и анализа вистлеров (AW-DAnet) Dr. J. Lichtenberger [5, 6].

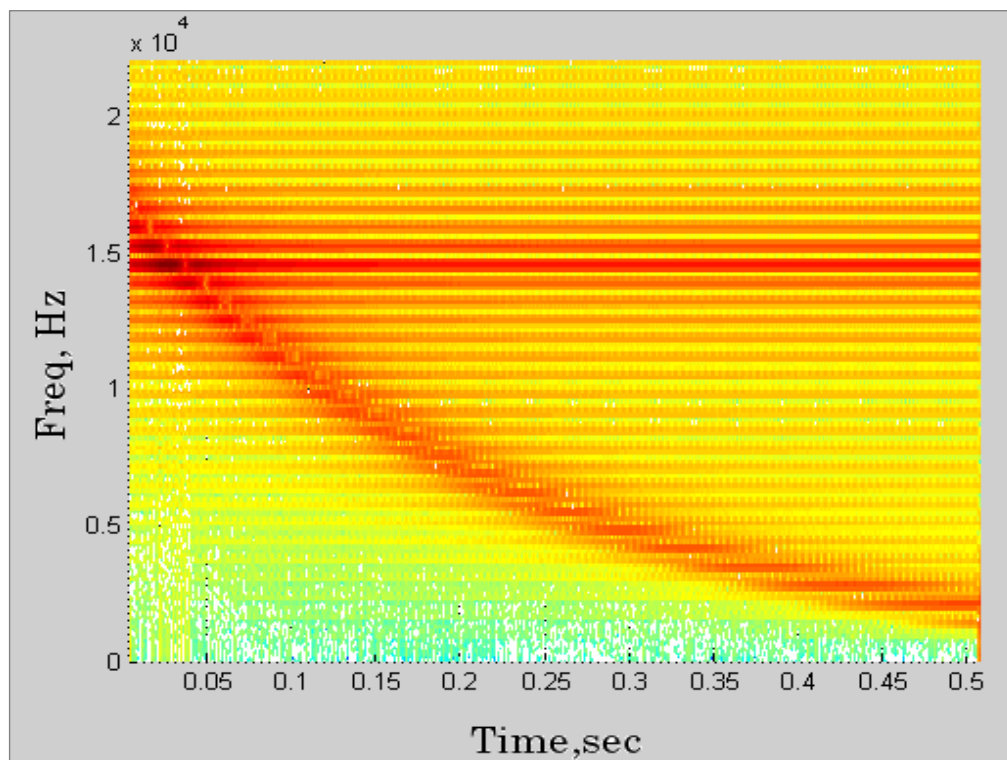


Рис. 7. Спектрограмма смоделированного свистящего атмосферика

Система, основанная на этом методе, состоит из детектора и решающего правила. Детектор выполняет двумерную корреляцию спектра фрагмента сигнала длительностью 4 секунды и смоделированного идеального спектра. Выходной сигнал детектора может быть представлен как в виде двумерной матрицы, так и, после несложных преобразований, в виде вектора значений.



Решающее правило (далее — адаптивный порог) формировался в соответствии с соображениями:

- 1) Размерность величины, представляющей собой порог, должна совпадать с размерностью выхода детектора, т.е. это должен быть квадрат амплитуды.
- 2) Порог должен представлять собой некоторую усредненную величину, чтобы по превышению её («нормального уровня») можно было сформировать вывод о том, что в сигнале присутствует вистлер.

С учетом обозначенных соображений, для вычисления порога выполняются следующие шаги:

- 1) Для каждого столбца спектрограммы высчитывается квадрат нормы.
- 2) Полученные значения обрабатываются усредняющим фильтром длиной 150 отсчетов.

Далее выход детектора сравнивается с адаптивным порогом, и если порог превышен, то, вероятно, в этом месте присутствует свистящий атмосферик.

Необходимо отметить, что большую погрешность (до 50 % ложных срабатываний) вносят атмосферика (грозовые разряды), которые видны в спектре как вертикальные линии. Для уменьшения их влияния на результат вводятся дополнительные процедуры, выполняемые по превышении порога (рис.8):

- 1) Выполняется проверка, на сколько процентов превышен порог. Если это превышение не достигает заданного пользователем значения (10-15 %), формируется сигнал «0» (нет вистлера).
- 2) Выполняется проверка, в течение какого времени наблюдалось превышение. Поскольку длительность вистлера, как правило, составляет 0,5-1,0 секунд, то сигнал «1» (вистлер присутствует) формируется только для превышения, длительность которого не выходит за указанные пределы.

3) После обработки 4х секундного фрагмента детектор обрабатывает следующий фрагмент, сдвинутый относительно предыдущего на 0,2 секунды, за счет чего происходит дополнительное уточнение результата.

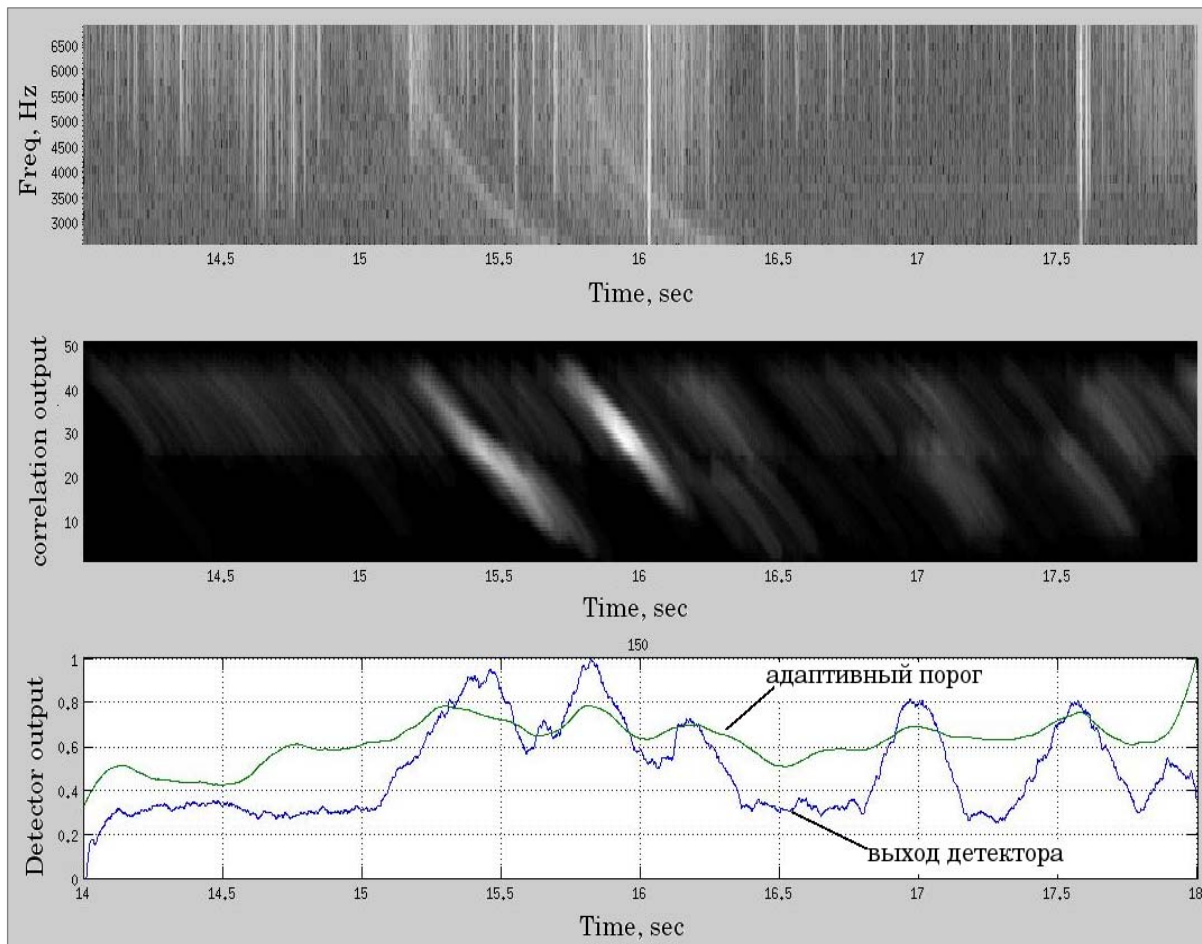


Рис. 8. Сверху вниз: спектрограмма сигнала; выход детектора в виде матрицы; выход детектора в виде вектора значений сравнивается с адаптивным порогом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Свистящие атмосферерики — низкочастотные электромагнитные сигналы атмосферного происхождения. Поскольку свистящие атмосферерики возникают при излучении грозовых разрядов, то их изучение может дать более глубокое понимание грозового процесса. То обстоятельство, что свистящие атмосферерики распространяются через ионосферу, делает их так же источником новых знаний об ионосфере, магнитосфере и протекающих в них процессах.

Для изучения свистящих атмосфериков в ИКИР ДВО РАН разрабатывается программный комплекс, который позволит детектировать вистлеры, распознавать, подсчитывать их и вести долговременную статистику появления свистящих атмосфериков.

В рамках подготовки такого комплекса была создана компьютерная имитация свистовой волны; частотно-временная зависимость полученного сигнала повторяет характерную для вистлеров зависимость частоты от времени.

Полученный сигнал используется в работе детектора свистящих атмосфериков, в основе которого лежит метод двумерной корреляции спектра исходного сигнала с идеальной спектрограммой свистовой волны.

Оценка результатов работы детектора показала, что число подсчитанных детектором вистлеров отличается от числа подсчитанных вручную номинально на 5-10%, однако от этого количества в среднем 1/3 срабатываний — ложные. Таким образом, число пропущенных вистлеров компенсируется ложными срабатываниями на коротких помехах (грозовых разрядах).

Такой результат, в целом, позволяет с известной точностью оценить число зарегистрированных свистящих атмосфериков. Однако улучшение результата, уменьшение количества ложных срабатываний, остается актуальной задачей, которая может быть решена введением дополнительных критериев для проверки того, в результате чего был превышен адаптивный порог — либо в сигнале в этот момент действительно присутствует вистлер, либо это ложное срабатывание на коротких, но мощных помехах.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 207 с.
2. Почтарев В.И. Магнетизм Земли и космического пространства. М.: Наука, 1966. 143 с.
3. Ратклифф Дж. А. Введение в физику ионосферы и магнитосферы. М.: Перевод на русский язык, Мир, 1975. 296 с.
4. Чернева Н.В., Holzworth R.H., Иванов А.В., Дружин Г.И., Мельников А.Н. Перспективы использования всемирной сети локации гроз (WWLLN) для определения пепловых извержений вулканов на Камчатке// Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Третьей научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский. 9-15 октября 2011 г. / Отв. ред. В.Н. Чебров. - Обнинск: ГС РАН, 2011. - 486 с. С.415-419.
5. Lichtenberger, J.(2009), A new whistler inversion method, J, Geophys. Res., 114, A07222, doi: 10.1029/2008JA013799.
6. Lichtenberger, J., Automatic Whistler Detector and Analyzer system, J. Geophys. Res., 113, A12201, doi: 10.29/2008JA013467, 2008.

**AUTOMATIC WHISTLER DETECTION***Agranat I.V.**Institute of Cosmophysical researches and Radio Wave Propagation*

Whistler is a type of natural VLF radiation.

Research of whistlers is important for deep and detailed study of lightning process, for identification of new interactions between the phenomena and processes in an ionosphere and a magnetosphere. It is possible to point out following directions for applications of whistler study: determination of electronic concentration in the ionosphere, investigation of natural and anthropogenous impact on the upper atmosphere. In order to solve these problems maintaining of a long-term whistler's statistics is necessary, which is impossible without aid of an automatic detecting system. But the problem of detecting in case of whistlers has some peculiarities: the useful signal is indiscernible on a wave form of representation therefore mainly signal spectrograms should be used. Moreover for a number of recognition methods it is necessary to have an ideal signal, free from hindrances. Therefore, there is a need of creation of imitation of a signal which will serve as a standard in detecting process. In the report the Automatic Whistler Detector is described, which was developed in the Institute of Cosmophysical researches and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences. Operation of the detector is based on two-dimensional correlation between a range of an initial signal and the standard signal range. The process of standard signal creation and intermediate results on detector reliability are also given in the report.

*Key words:* ionosphere, lightning, whistlers, AWDAnet, correlation analysis, time-frequency analysis.