



Общероссийский математический портал

Н. В. Чернева, Г. М. Водинчар, В. П. Сивоконь, А. Н. Мельников, Д. В. Санников, И. В. Агранат, Корреляционный анализ потоков свистящих атмосфериков и грозовых разрядов, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2013, выпуск 2(7), 59–67

DOI: <http://dx.doi.org/10.18454/2079-6641-2013-7-2-59-67>

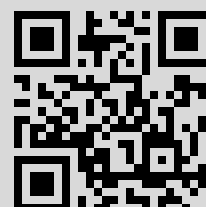
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 77.82.207.136

15 июля 2016 г., 14:41:58



DOI: 10.18454/2079-6641-2013-7-2-59-67

УДК 551.594

## **КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ПОТОКОВ СВИСТЯЩИХ АТМОСФЕРИКОВ И ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ**

**Н.В. Чернева<sup>1</sup>, Г.М. Водинчар<sup>1, 2</sup>, В.П. Сивоконь<sup>1</sup>,  
А.Н.Мельников<sup>1</sup>, Д.В. Санников<sup>1</sup>, И.В.Агранат<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, 684034, Камчатский край, п. Паратунка, ул. Мирная, 7

<sup>2</sup> Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4

E-mail: nina@ikir.ru

Исследована статистическая связь между вистлерами, регистрируемыми на Камчатке, и грозовой активностью в магнитно-сопряженной точке. Проанализирована возможность влияния на поток вистлеров нагревного стэнда HAARP.

*Ключевые слова: атмосферерики, вистлеры, ОНЧ-излучение, модификация ионосферы*

© Чернева Н.В. и др., 2013

MSC 86A10

## **CORRELATION ANALYSIS OF STREAMS OF WHISTLERS AND LIGHTNINGS**

**N.V. Cherneva<sup>1</sup>, G.M. Vodinchar<sup>1, 2</sup>, V.P. Sivokon'<sup>1</sup>,  
A.N. Mel'nikov<sup>1</sup>, D.V. Sannikov<sup>1</sup>, I.V. Agranat<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Institute of Cosmophysical Researches and Radio Wave Propagation Far-Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, 684034, Kamchatskiy Kray, Paratunka, Mirnaya st., 7, Russia

<sup>2</sup> Vitus Bering Kamchatka State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky, Pogranichnaya st., 4, Russia

E-mail: nina@ikir.ru

The sttatistical relationship between whistlers in Kamchatka and thunderstorm activity was studied. Possibility of impact HAARP on stream of whistlers analyzed.

*Key words: atmosphericics, whistlers, VLF radiation, modification of the ionosphere.*

© Cherneva N.V. et al., 2013

## Введение

Грозовые разряды, являясь источниками импульсных электромагнитных сигналов, порождают электромагнитное излучение в очень широком диапазоне частот, в том числе и в радиодиапазоне очень низких частот (ОНЧ). Радиоимпульсы грозовых разрядов, называемые атмосфериками, распространяются вдоль поверхности Земли по радиоволноводу земля-ионосфера и могут через ионосферу проникать в магнитосферные радиоволноводы (дакты) и вдоль силовых линий геомагнитного поля распространяться в магнитно-сопряженные точки (рис. 1).

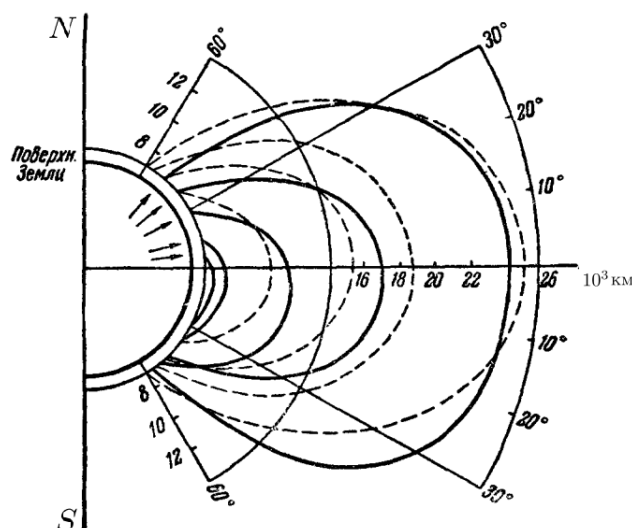


Рис. 1. Расчетные траектории вистлеров (сплошные кривые) и силовые линии геомагнитного поля (пунктирные линии) из работы [1]

Радиосигналы грозовых разрядов, прошедшие через магнитосферу, диспергируют, и в пункт регистрации наблюдается понижающийся по частоте сигнал. Акустическим аналогом таких сигналов является свист, поэтому их называют свистящими атмосфериками или вистлерами (whistlers) [1]. Связь формы вистлеров с плотностью магнитосферной плазмы позволяет определять ее состояние, а отражения вистлеров в волноводе позволяют исследовать его неоднородности. Эти особенности радиосигналов используются при разработке дистанционных методов исследования динамики магнитосферы, которая рассматривается как система космической погоды. Исследование вистлеров имеет большое значение и для изучения особенностей грозовой активности, электромагнитных шумов атмосферы и взаимодействия нижних и верхних ее слоев.

## Аппаратная и методическая организация наблюдений

Для регистрации атмосфериков создана Всемирная сеть локализации гроз World Wide Lightning Location Network (WWLLN, R.H. Holzworth, а для детектирования вистлеров – Automatic Whistler Detector and Analyzer systems' network (AWDANet, J. Lichtenberger). В Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР) под руководством разработчиков этих систем изготовлены и установлены приемные станции, интегрированные в обе сети. Кроме

этого, ИКИР имеет две системы радионаблюдений собственной разработки: ОНЧ-пеленгатор для локации атмосфериков и ОНЧ-регистратор для определения вистлеров.

ИКИР непрерывно осуществляет пеленгацию гроз, что позволяет определять координаты источника грозового импульса, а также регистрировать частоту разрядов в определенном районе и по всей Земле, с помощью приемной станции, входящей во Всемирную сеть WWLLN. Сеть включает около 80-ти приёмных станций, определяющих местонахождение гроз по всему миру, находящихся на парных расстояниях от нескольких метров до 10 тыс. км. Размещение станций мировой сети показано на сайте <http://webflash.ess.washington.edu/>. Приёмные станции регистрируют излучения, приходящие по волноводу Земля-ионосфера, с максимумом на частоте 10 кГц (длина волны 30 км). Для локализации грозы достаточно трех приёмных станций, окружающих грозу. Каждая из этих станций посылает в центральный обрабатывающий компьютер с точностью до нескольких микросекунд время прибытия радиоимпульса грозового разряда (атмосферика) и уже через 10 минут спектрограммы с этих станций обновляются на <http://webflash.ess.washington.edu/spectra.html>.

Для определений характеристик вистлеров создана AWDANet, которая в комплексе с WWLLN позволяет проследить пути движения зондирующих радиосигналов и исключить возникающие неоднозначности в их распространении. Сеть AWDANet [2] была недавно расширена дальневосточной станцией Карымшина, Камчатка, Россия (LAT 52.83, LON 158.13, L=2.13). Активность вистлеров необычно высокая, самая высокая в сети AWDANet, в отличие от Европейских станций. За первых пять месяцев работы было зарегистрировано более 200000 вистлеров. Глобальная система AWDANet недавно была дополнена включением в нее автоматического анализатора PLASMON (<http://plasmon.elte.hu>). Он основан на недавно разработанной модели инверсии вистлеров [3], что позволило автоматизировать процесс анализа вистлеров не только для событий с приходом одного вистлера, но и для комплексного анализа многокомпонентного распространения групп вистлеров.

В ИКИР разработан алгоритм автоматического распознавания вистлеров [4]-[5]. Работа детектора в данном алгоритме основывается на двумерной корреляции спектра исходного сигнала и спектра сигнала-эталона. Необходимо отметить, что имеющаяся аппаратура не позволяет регистрировать носовую частоту, но диапазон частот от  $2.5 \div 7$  кГц может быть полезным для статистического анализа, т.к. захватывает часть вистлера, и в тоже время является наименее зашумленным. Моделирование сигнала-эталона происходит в результате аппроксимации пика атмосферика в текущий момент времени функцией, соответствующей плотности нормального распределения и аппроксимации зависимости частоты от времени экспоненциальной функцией. Система, основанная на этом методе, состоит из детектора и решающего фактора – адаптивного порога. Детектор выполняет двумерную корреляцию спектра фрагмента сигнала длительностью 4 секунды и смоделированного идеального спектра. Адаптивный порог представляет некоторую усредненную величину, при превышении «нормального уровня» которого формируется вывод о том, что в сигнале присутствует вистлер. 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 превышению порога:

1) Выполняется проверка, на сколько процентов превышен порог. Если это превышение не достигает заданного пользователем значения ( $10 \div 15\%$ ), формируется сигнал «0» (нет вистлера).

2) Выполняется проверка, в течение какого времени наблюдалось превышение над порогом. Поскольку длительность вистлера находится в пределах  $0.5 \div 2$  сек., то свистящий атмосферерик определяется тем, как длительность сигнала укладывается в эти пределы.

3) После обработки 4-х секундного фрагмента детектор обрабатывает следующий фрагмент, сдвинутый относительно предыдущего на 0.2 секунды, за счет чего происходит дополнительное уточнение результата.

## Визуальный анализ связи вистлеров и грозовой активности

Полученные промежуточные результаты автоматического детектирования свистящих атмосферериков были сопоставлены с данными сети WWLLN. Был проведен визуальный сравнительный анализ гистограмм потока распознанных вистлеров на Камчатке и потоков грозовых разрядов на Камчатке и в магнитно-сопряженной для Камчатки точке в Австралии. Было обнаружено, что грозовые разряды, генерирующие атмосферерики в магнито-сопряженной точке, не всегда имеют высокую корреляцию с количеством зарегистрированных на Камчатке вистлеров, число которых достигает нескольких тысяч в течение суток. Возможно, что молниевые удары генерируют свистящие атмосферерики, которые распространяются в волноводе Земля-ионосфера, даже если грозовой очаг находится на значительном расстоянии от сопряженной точки.

При сравнении потока вистлеров с грозовой активностью с 01:30 по 08:12 UT 22.02.2012 было обнаружено увеличение потока вистлеров с увеличением грозовой активности в сопряженной точке (рис. 2а).

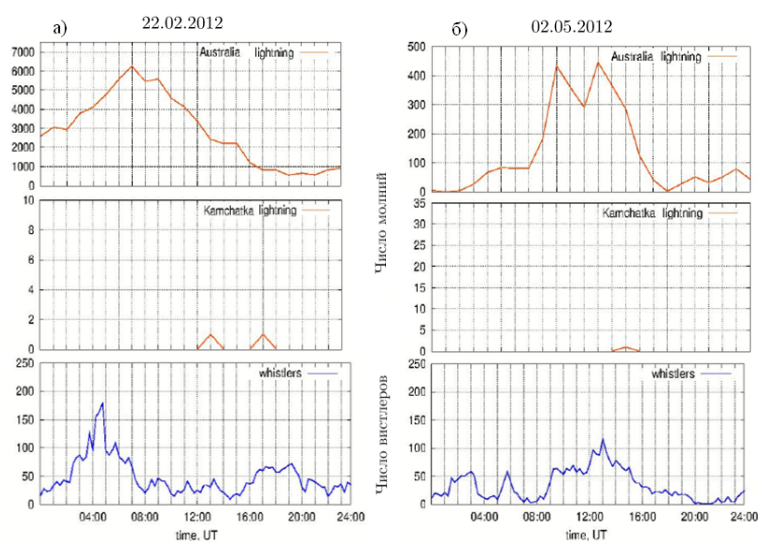


Рис. 2. Сравнение потока вистлеров (число вистлеров/15 минут) с грозовой активностью (число атмосферериков/час) в сопряженных точках за 22.02.2012 и 2.05.2012

Можно сделать вывод о том, что изменение потока вистлеров в основном определяется грозовой активностью в сопряженной точке. Однако при более детальном рассмотрении был получен другой результат (рис. 3).

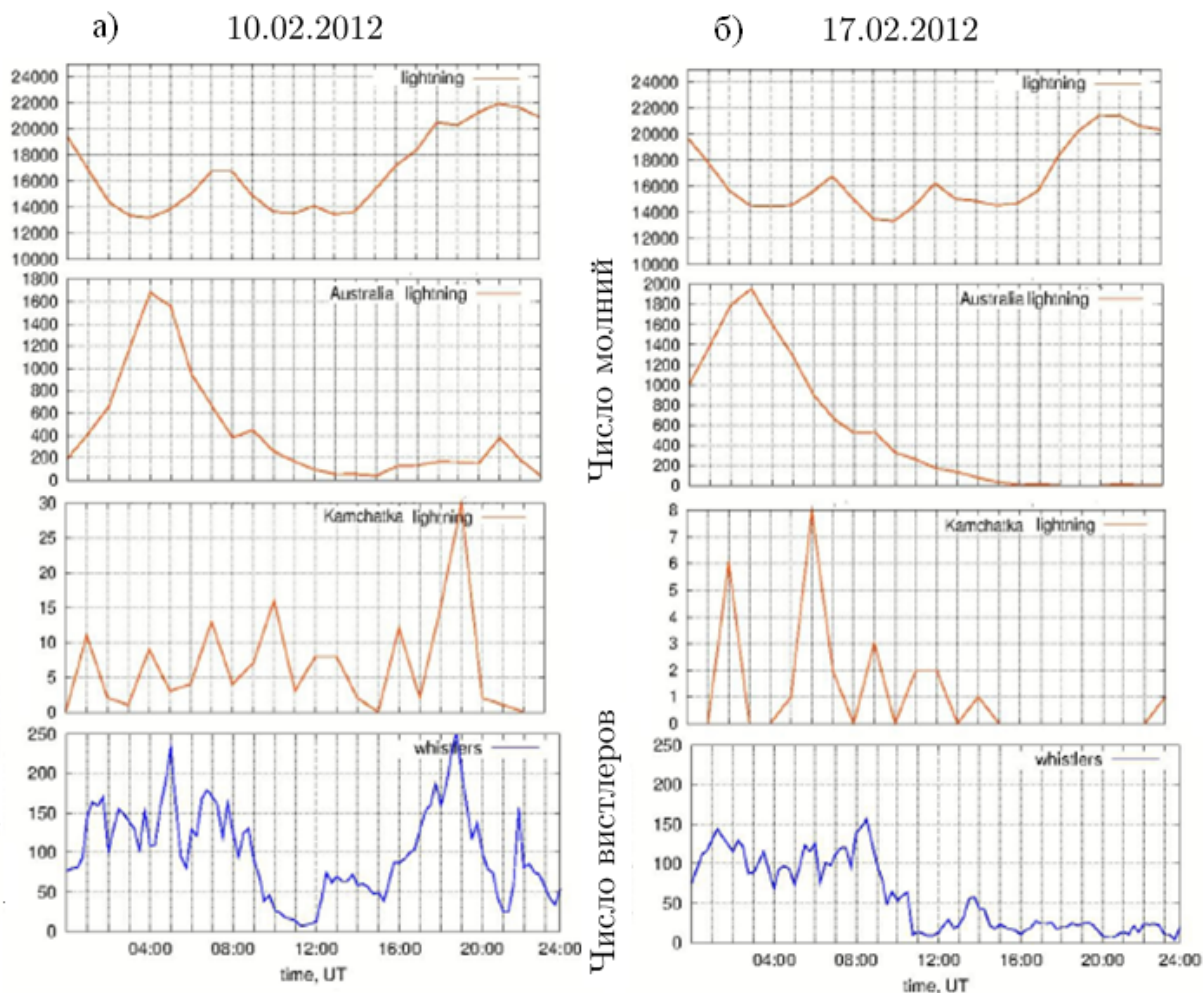


Рис. 3. Сравнение потока вистлеров (число вистлеров/15 минут) с мировой грозовой активностью (число атмосфериков/час) и грозовой активностью в сопряженных точках (Австралия, Камчатка) за 10.02.2012 и 17.02.2012

Принимая во внимание среду распространения вистлеров (ионосфера, магнитосфера, ионосфера) и их связь с грозowymi разрядами, можно предположить, что антропогенное воздействие на ионосферу также может повлечь за собой рост числа вистлеров. Поскольку активное воздействие на ионосферу оказывает американский нагревательный стенд система HAARP (High Frequency Active Auroral Research Program), возникает гипотеза о связи результатов работы этой системы и динамики появления вистлеров.

Для проверки были сопоставлены спектрограмма процесса нагревания ионосферы антеннами HAARP с количеством вистлеров. Результаты представлены на рис. 4а.

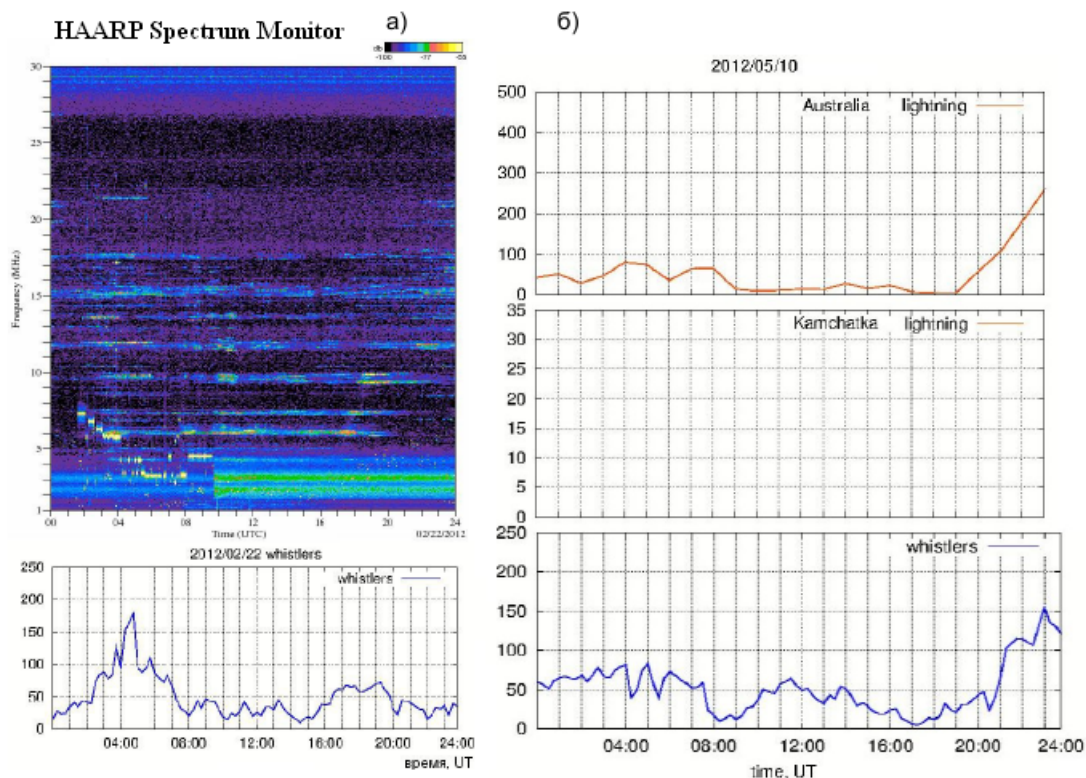


Рис. 4. Сопоставление спектрограммы нагрева ионосферы антеннами HAARP и изменение потока вистлеров (число вистлеров/15 минут) в течение 22.02.2012

Верхний график – спектрограмма процесса нагрева ионосферы в течение суток, нижний график – изменение числа вистлеров в течение суток. Заметна связь после длительного нагревного воздействия на ионосферу во время работы HAARP (с 01:30 до 08:12 UT 22.02.2012), наблюдается увеличение потока вистлеров (числа вистлеров за 15 минут). Однако для того чтобы более точно установить такую связь, необходимо обработать большой промежуток времени, провести анализ зависимости вистлеров в сопоставлении с изменением грозовой активности.

В целях дальнейших исследований проанализирован весь промежуток времени работы HAARP за 2012 год, и проведено сопоставление с грозовой активностью в сопряженных точках, а за февраль месяц и в сравнении с общемировой грозовой активностью. Обнаружено, что в большинстве случаев увеличение числа вистлеров, все таки, имеет прямую связь с увеличением грозовой активности (рис. 2а и рис. 2б). Но в некоторых случаях после длительного воздействия на ионосферу нагревными частотами эта зависимость перестает быть очевидной, а во время работы HAARP наблюдается резкое уменьшение регистрации числа вистлеров, не зависимо от грозовой активности. На рис. 4б представлено, как уменьшение в момент проведения экспериментов, так и прямая связь с увеличением грозовой активности в сопряженной точке.

### Корреляционный анализ потоков грозовых разрядов и вистлеров

В целях проверки статистической значимости визуально наблюдаемых связей анализировались корреляционные связи двух точечных процессов – потока грозовых

разрядов (атмосфериков) по данным всемирной сети локации гроз WWLLN и потока вистлеров, регистрируемых на Камчатке в ИКИР в течение 1-11 марта 2013 г. Каждый поток был представлен интенсивностью – числом событий в 15 мин. интервале дискретизации.

Как уже упоминалось выше механизм формирования вистлеров позволяет ожидать на Камчатке регистрации двух типов этих сигналов. Это вистлеры, сгенерированные разрядами в магнитно-сопряженной точке в Австралии и пришедшие из нее через силовую трубку магнитного поля, и вистлеры, сгенерированные камчатскими грозами и прошедшие через эту трубку четное число раз. При этом вистлеры австралийского происхождения также могут неоднократно (нечетное число раз) проходить через трубку.

В связи с этим из базы данных сети WWLLN отбирались разряды, возникавшие в координатных прямоугольниках LAT 25S-45S, LON 140E-160E (Австралия) и LAT 43N-63N, LON 150E-170E (Камчатка). Рассматривалась корреляция потока вистлеров с потоками камчатских и австралийских грозовых разрядов по-отдельности и с объединенным потоком. Сопоставление потоков производилось визуально и с помощью расчета коэффициента корреляции в скользящем временном окне, длительностью 1 сут. Каждому положению окна при этом соответствуют 96 отсчетов времени. При оценке коэффициента корреляции  $\rho$  по такому числу отсчетов вывод о коррелированности при уровне значимости  $\alpha = 0.05$  можно делать при  $\rho \geq 0.25$  [5].

На рис. 5 приведены интенсивности потоков грозовых разрядов Австралии и зарегистрированных на Камчатке вистлеров и коэффициент корреляции между ними.

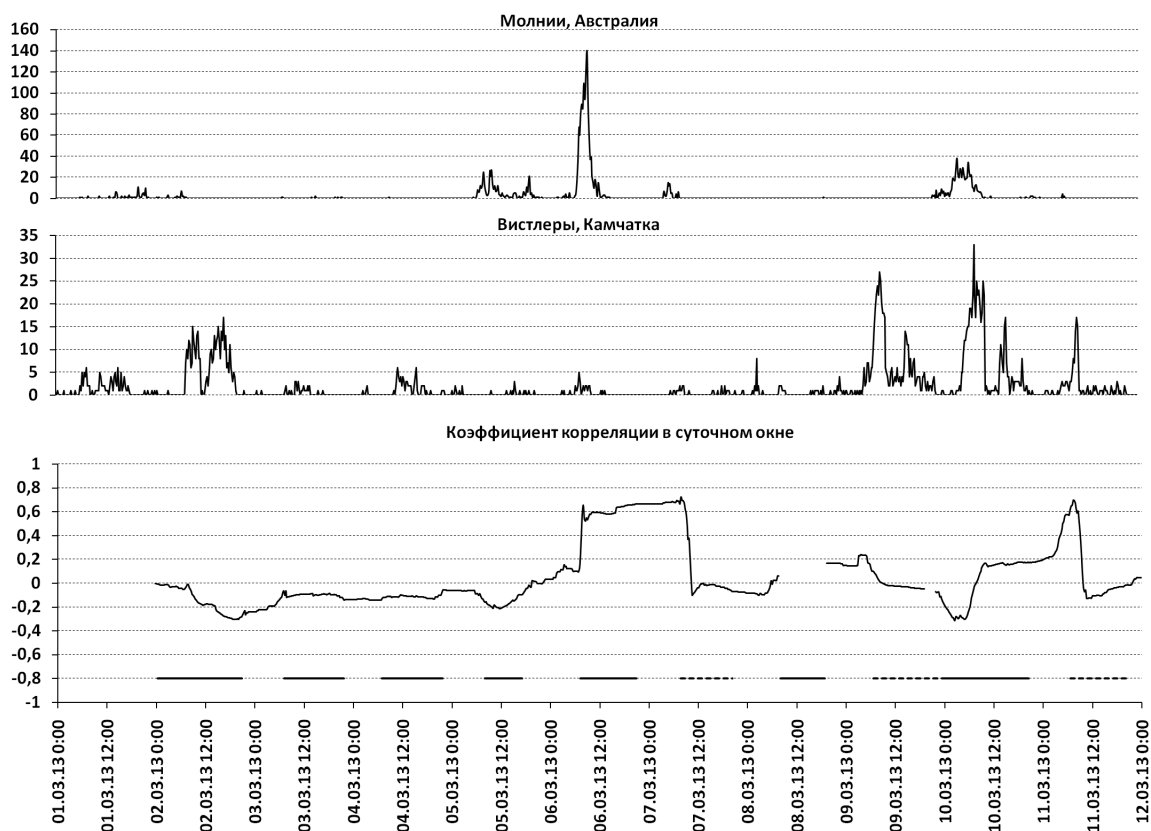


Рис. 5. Интенсивности атмосфериков Австралии и вистлеров Камчатки в период 1-12 марта 2013 г.



На графике корреляции отмечен критический уровень  $\rho = 0.25$ . На аналогичном рис. 6 представлены Камчатские атмосферерики и вистлеры.

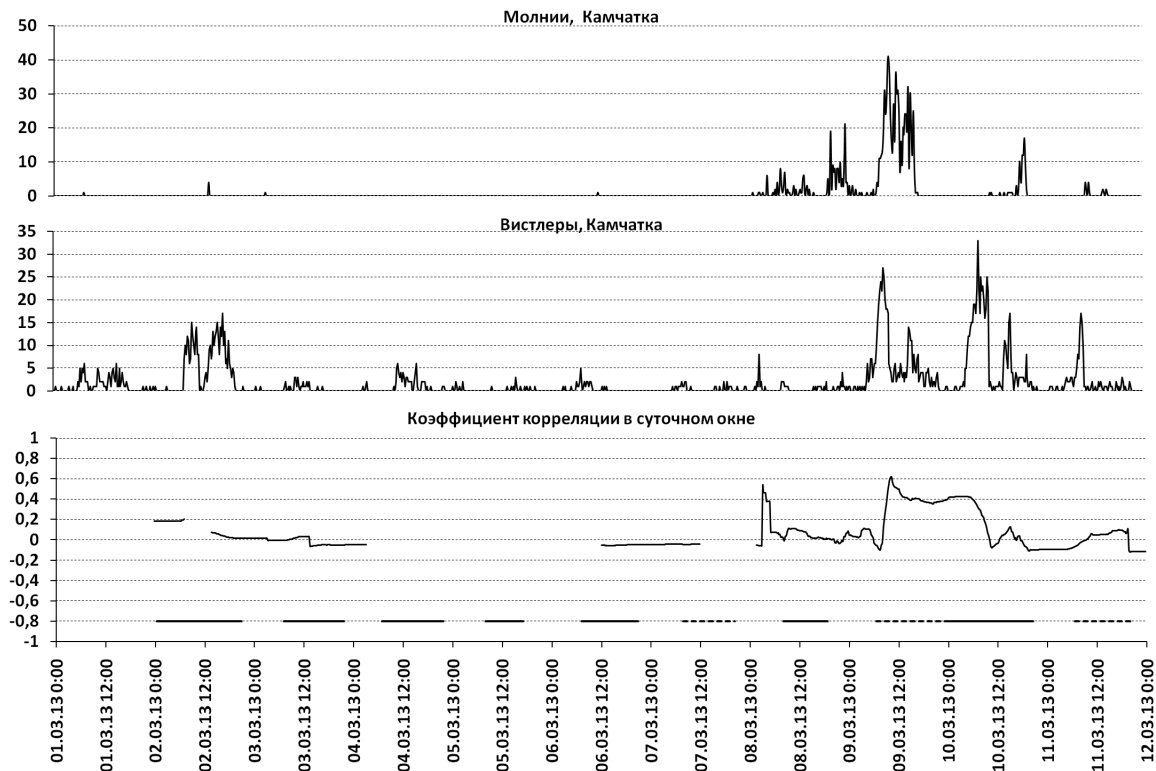


Рис. 6. Интенсивности атмосферерики и вистлеров Камчатки в период 1-12 марта 2013 г.

На графиках корреляции на рис. 5 и 6 отмечены периоды длительных непрерывных нагревов и «простоев» НААРП. На уровне  $-0.8$  горизонтальными сплошными линиями отмечены промежутки непрерывного длительного ( $>10$  часов) нагрева, а пунктирными — промежутки, когда НААРП не работал более 10 часов.

Из рисунков хорошо виден отклик потока вистлеров на сильную грозу в Австралии 6:00-12:00 UT 06.03.2013 и на более слабые 6:00-23:00 UT 05.06.2013, 6:00-12:00 UT 07.03.2013, 6:00-12:00 UT 10.03.2013. Виден и отклик на камчатские грозы 18:00-24:00 UT 08.03.2013, 8:00-19:00 UT 09.03.2013. Таким образом, в основном, вистлеры на Камчатке формируются грозовыми очагами в Австралии и Камчатскими грозами.

В то же время отметим всплеск вистлеров 6:00-10:00 UT 11.03.2013 произошедший несколько раньше слабой грозы на Камчатке (11:00 UT, рис. 3). Видимо его возникновение можно объяснить дрейфом вистлеров из других силовых трубок. Похожая ситуация была и со всплесками вистлеров 7:00-20:00 UT 02.03.2013, однако следует отметить, что это совпало с промежутком длительной работы НААРП. Поэтому возможно, что данный всплеск связан с работой нагревного стенда.

## Заключение

Сильные увеличения коэффициента корреляции между потоками вистлеров и атмосферерики возникают, когда в пределы скользящего окна попадают резкие выбросы

либо в потоке вистлеров, либо в потоке гроз. Это можно объяснить большой чувствительностью этой статистической характеристики, как и любой другой, основанной на расчете средних значений, к сильным выбросам в данных. В целом, следует признать, что применение аппарата корреляционного анализа не дало статистически значимого подтверждения связи потока вистлеров на Камчатке с активностью грозового очага Австралии. Вероятно, потребуются статистические характеристики малочувствительные к выбросам, основанные на квантильных значениях.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН 12-И-П4-05 «Обнаружение изменений климатообразующих характеристик на основе мониторинга вариаций геофизических полей», программе ОФН РАН 12-И-ОФН-15 «Научное обоснование и разработка технологии комплексного мониторинга эффективности воздействия мощными радиоволнами на ионосферу и плазмосферу Земли» и Минобрнауки России по Программе стратегического развития КамГУ им. Витуса Беринга на 2012-2016 гг.

### Библиографический список

1. Гершман Б.Н., Угаров В.А. Распространение и генерация низкочастотных электромагнитных волн в верхней атмосфере // Успехи физических наук. 1960. Т. 72. № 2. С. 235-271.
2. Lichtenberger J., Ferencz C., Bodnár L., Hamar D., Steinbach P. Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Automatic Whistler Detector // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2008. Vol. 113 № A12. DOI:10.1029/2008JA013467. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JA013467>
3. Lichtenberger J. A new whistler inversion method // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2009. Vol. 114. № A7. DOI:10.1029/2008JA013799. <http://dx.doi.org/10.1029/2008JA013799>
4. Чернева Н. В., Агранат И.В. Автоматическое детектирование свистящих атмосфериков и их сопоставление с грозовой активностью // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству: сб. трудов, т. 2, г. Санкт-Петербург, 24-28 сентября 2012 г.; ГГО им. А.И. Воейкова. Санкт-Петербург, 2012. 49 с. С 45-46.
5. Cherneva N.V., Sivokon' V.P., Agranat I.V. Spectral characteristics of whistlers // Problems of Geocosmos: Proc. of the 9th Int. Conf., St. Petersburg, October 8-12, 2012.; St. Petersburg State University. SPb, 2012. 451 p. P.212-217.
6. [http://nova.stanford.edu/vli/research\\_topics/raytracing/raytracing.mp4](http://nova.stanford.edu/vli/research_topics/raytracing/raytracing.mp4)
7. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королюк и др. – М.: Наука, 1985. 640 с.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 20.10.2013