

УДК 551.594

ВОЗМОЖНОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ АКТИВНОСТИ МИРОВЫХ ГРОЗОВЫХ ЦЕНТРОВ В ПОТОКЕ ВИСТЛЕРОВ НА КАМЧАТКЕ

**Г.М. Водинчар^{1, 2}, В.П. Сивоконь¹, Б.М. Шевцов¹,
Н.В. Чернева¹, Е.А. Малыш²**

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

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

E-mail: gvodinchar@gmail.com

В работе исследуются возможные источники камчатских вистлеров в марте и сентябре 2013 г. С использованием данных мировых сетей WWLLN и AWDANet и методов корреляционного анализа показано, что статистически значимые источники могут находиться в мировых грозových очагах.

Ключевые слова: Вистлеры, ОНЧ-излучение, магнитосфера

© Водинчар Г.М. и др., 2014

MSC 86A10

MANIFESTATION OF THE WORLDS'S CENTERS OF LIGHTNING ACTIVITY IN THE WHISTLER IN KAMCHATKA

G.M. Vodinchar^{1, 2}, V.P. Sivokon¹, B.M. Shevtsov¹, N.V. Cherneva¹, E.A. Malysh²

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

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

E-mail: gvodinchar@gmail.com

We study the possible sources of Kamchatka whistlers in March and September 2013. Using these global networks WWLLN and AWDANet and methods of correlation anaziz shown that statistically significant sources are located in the global thunderstorm activity.

Key words: whistlers, VLF radiation, magnetosphere.

© Vodinchar G.M., et al., 2014

Введение

Каждый грозовой разряд, произошедший в атмосфере Земли, формирует электромагнитный импульс распределенный в широком частотном диапазоне. В частности, этот импульс проявляется и в диапазоне очень низких частот (ОНЧ), где называется атмосфериком [1]. Помимо атмосфериков, в радиосигналах ОНЧ диапазона проявляются также сигналы имеющие в характерную саблеобразную форму в спектрально-временной диаграмме. Пример такого сигнала приведен на рис. 1. Акустическим аналогом сигнала с таким спектром является свист, поэтому их называют свистящими атмосфериками или вистлерами. Также как и атмосферерики, вистлеры напрямую связаны с грозными разрядами.

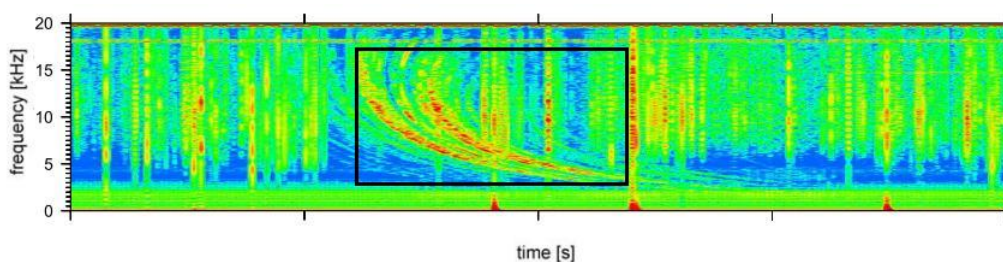


Рис. 1. Типичное проявление вистлера в спектрально-временной диаграмме ОНЧ сигнала

Механизм образования вистлеров был предложен в классической работе Стори [2]. В соответствии с этой теорией, инициированный грозным разрядом атмосферик с мощностью ~ 20 ГВ распространяется в волноводе Земля-ионосфера. При этом он почти не рассеивается и может проходить значительные расстояния с небольшим отклонением ~ 1 дБ/Мм. Однако, некоторая часть энергии атмосферика может проникать через ионосферу и входить в магнитосферу. В неоднородной и анизотропной магнитосферной плазме электромагнитная волна претерпевает частотную дисперсию. В результате импульс трансформируется в сложный сигнал с саблеобразной частотно-временной характеристикой, определяемой напряженностью силовой линии и плотностью плазмы вдоль траектории в магнитосфере. То, что форма вистлера зависит от распределения плазмы и интенсивности поля, делает его природным маркером состояния плазмосферы Земли и крайне интересным объектом в системе космической погоды.

В соответствии с описанным механизмом наиболее вероятный грозовой источник вистлера может находиться либо в окрестности точки его регистрации, либо в окрестности магнитно-сопряженной точки. В первом случае регистрируется вистлер, преодолевший магнитосферный канал четное число раз, во втором – нечетное. Однако теоретически возможен дрейф вистлеров в магнитосфере между различными волноводами и регистрация "посторонних" вистлеров [1].

Преимущественные условия для проникновения ОНЧ сигнала в магнитосферный канал существуют в высоких широтах, где силовые линии почти вертикальны и интенсивность поля выше [3]. Также необходимо отметить, что возможен и дрейф вистлеров между трубками, если длина волны сравнима с шириной дукта [4, 5]. Таким образом, несмотря на то, что большинство гроз происходит в областях низких широт (тропики и субтропики), источники вистлеров преимущественно лежат выше

по геомагнитной широте. Можно даже полагать, что существует широта обрезания для вистлеров на уровне примерно $\pm 16^\circ$ широты [6, 7].

Если относительно механизма формирования вистлеров среди специалистов разногласий нет, то параметры и геометрия области грозового источника являются дискуссионными. Наиболее естественно предположить, что источник должен быть симметричен относительно точки входа в магнитосферу и эффективность проникновения должна спадать по мере удаления от этой точки. Однако в ряде работ установлено, что эффективность проникновения смещена относительно точки входа по направлению к геомагнитному полюсу [8, 9]. Нет единого мнения и относительно размеров области.

В настоящей работе исследуется вопрос о том, регистрируются ли на Камчатке "посторонние" вистлеры.

Исходные данные

Детальная информация о распределении грозовых разрядов, происходящих на Земле содержится в базах данных мировой сети локализации гроз World Wide Lightning Location Network (WWLLN). Создание и развитие этой сети реализуется под общим руководством специалистов Университета Вашингтона, Сиэтл, США (<http://webflash.ess.washington.edu/>).

Сеть дает достаточно точное отображение глобальной грозовой активности. Она фиксирует разряды с большими токами и регистрирует первый удар в мульти-вспышке. Для каждого удара фиксируется время и географические координаты, где временное и пространственное разрешения составляют соответственно примерно 3×10^{-5} с и 10 км [10]. 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 рис. 2.

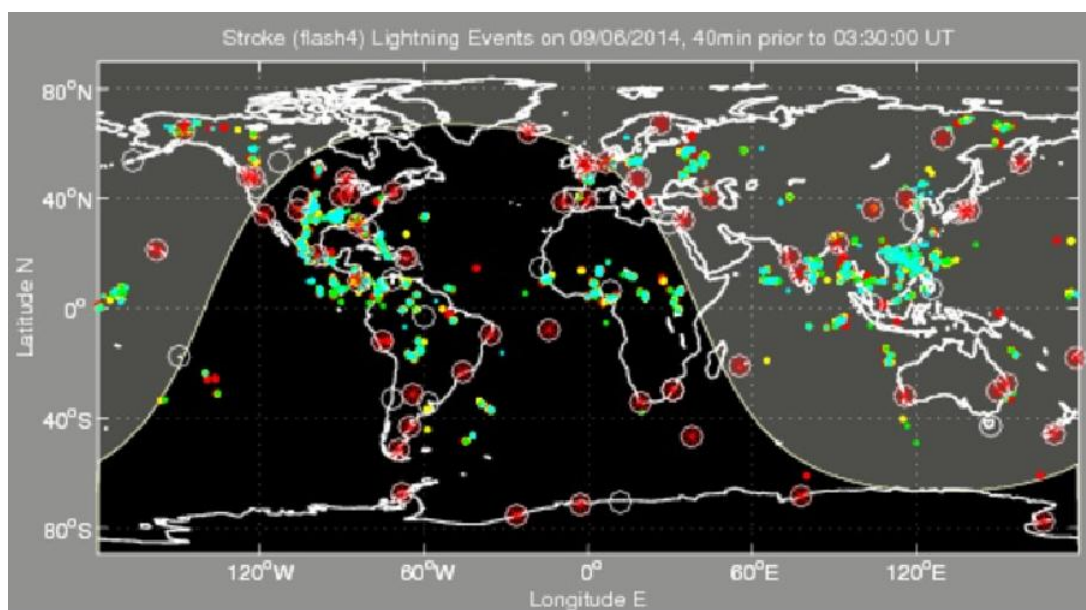


Рис. 2. Расположение приемных станций сети WWLLN. Изображение с сайта <http://webflash.ess.washington.edu/>

WWLLN позволяет идентифицировать грозные разряды облако-земля (CG), облако-облако (CC), внутриоблачные (IC), но не дает возможности различать их [10]. Сравнение эффективности обнаружения разрядов WWLLN и ряда региональных сетей показало, что WWLLN позволяет получать репрезентативную информацию о грозной активности в планетарном масштабе [11, 12].

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. Спектрограммы со станций каждые 10 мин. обновляются на странице <http://webflash.ess.washington.edu/spectra.html>. Одна из станций этой сети установлена на Камчатке в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН. Данные WWLN позволяют для выбранного географического региона составить временную последовательность – возрастающую последовательность случайных моментов молниевых ударов.

Для глобального детектирования вистлеров на Земле была создана система Automatic Whistler Detector and Analyzer systems' network (AWDANet). Работы по ее созданию и развитию ведутся в рамках нескольких международных проектов под руководством специалистов Университета им. Р. Йотвоша, Будапешт, Венгрия [13]. AWDANet была недавно расширена дальневосточной станцией Карымшина, Камчатка, Россия (LAT 52.83, LON 158.13, L=2.13). Активность регистрируемых на Камчатке вистлеров необычно высокая. За первых пять месяцев работы было зарегистрировано более 200 тыс. вистлеров. Система AWDANet была дополнена включением в нее автоматического анализатора PLASMON (<http://plasmon.elte.hu>). Он основан на недавно разработанной модели инверсии вистлеров [14], что позволило автоматизировать процесс анализа вистлеров не только для событий с приходом одного вистлера, но и для комплексного анализа многокомпонентного распространения групп вистлеров. Расположение станций AWDANet показано на рис. 3.

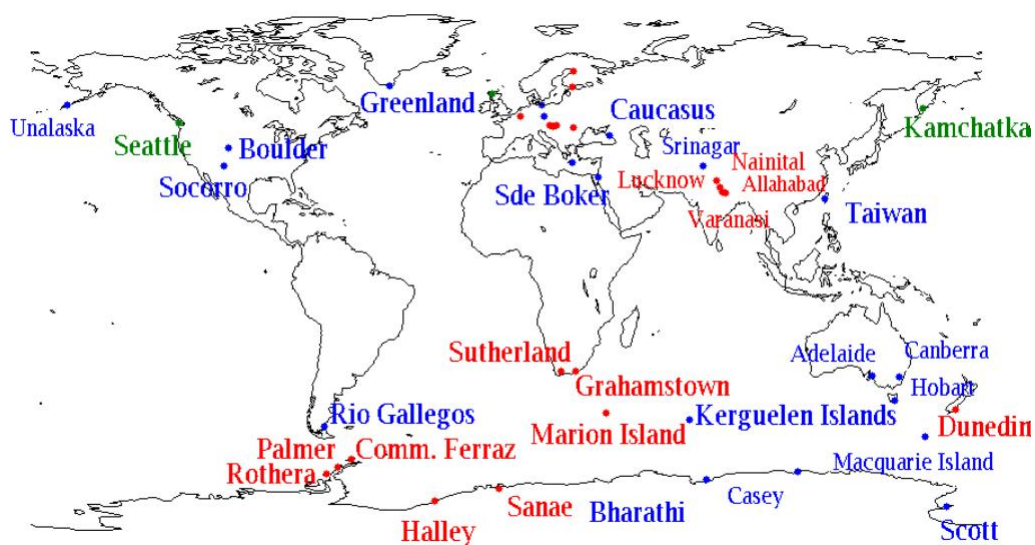


Рис. 3. Расположение приемных станций сети AWDANet. Красные и зеленые точки соответствуют действующим станциям. Синие – планируемые к пуску. Изображение с сайта <http://plasmon.elte.hu>

Для автоматического обнаружения вистлеров с учетом региональных особенностей их дисперсионных кривых в ИКИР ДВО РАН разработан алгоритм распознавания [15, 16], в основе которого лежит метод двумерной корреляции спектра исходного сигнала и спектра сигнала-эталона. Система, основанная на этом методе, состоит из детектора и решающего фактора - адаптивного порога. Детектор выполняет двумерную корреляцию спектра фрагмента сигнала во временном окне длительностью 4 сек. и смоделированного идеального спектра. Адаптивный порог представляет некоторую усредненную величину, при превышении «нормального уровня» которого формулируется предварительный вывод о том, что в сигнале присутствует вистлер. Алгоритм обнаружения реализован в работающей в автоматическом режиме нейронной сети.

Методика анализа

Мы анализировали статистические связи между камчатскими вистлерами и грозовыми разрядами из фиксированного географического региона корреляционным методом.

Составлялся временной ряд вистлеров W_t , представляющий собой число свистящих атмосфериков зарегистрированных за промежуток времени $[t; t + \Delta t]$. Для фиксированного географического региона из базы данных сети WWLLN составлялся временной ряд грозовых разрядов L_t , зарегистрированных в данном регионе за тот же промежуток времени. Длина интервала дискретизации Δt составляла 1 мин. и 15 мин. для двух вариантов сравнения. Поскольку интервал дискретизации был много больше времени распространения сигнала от грозового источника до точки регистрации вистлера даже в случае многократного прохождения в магнитосфере, кросс-корреляцию между рядами считали только при нулевом сдвиге времени.

Характерной особенностью анализированных временных рядов является наличие сильных выбросов – число событий может резко меняться в соседних временных отсчетах от нуля до сотен. Известно, что обычно используемый коэффициент корреляции Пирсона очень чувствителен к подобным выбросам, как и любая другая характеристика, основанная на средних значениях. Кроме этого, в случае если коэффициент корреляции мал, то делать вывод о независимости рядов можно только в случае гауссовских статистик, что ввиду наличия сильных выбросов также неверно для анализируемых рядов. Также в случае сильной, но существенно нелинейной связи, коэффициент корреляции может быть мал или даже равен нулю.

Для того чтобы подавить эффект больших выбросов при исследовании связи между вистлерами и грозами иногда огрубляют данные до булевых значений. В это случае, если в интервале были разряды или вистлеры отсчету временного ряда приписывается значение 1, в противном случае 0 [17, 18].

Альтернативным вариантом получения робастных оценок является использование реальных, а не булевских значений временных рядов, в сочетании с расчетом коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Он представляет собой корреляцию между рангами значений в рядах данных и устойчив к их монотонным преобразованиям [19]. В частности, на него не оказывают влияния резкие выбросы. Представляется, что использование ранговой корреляции позволяет с одной стороны получить надежные статистические выводы, а с другой, не терять информацию при булевском огрублении.

Результаты анализа

Анализировались два промежутка времени: 1-11 марта 2013 г. и 1-30 сентября 2013 г. В первом случае применялся расчет ранговой корреляции, а во втором округление рядов до булевских значений.

Рассмотрим результаты анализа для каждого из случаев подробно.

В первом случае мы проводили выборку гроз для составления ряда L_t по крупным географическим регионам: Камчатка (LAT 43N-63N LON 150E-170E), Австралия (LAT 25S-45S LON 140E-160E), грозовые центры Американский (LAT 0N-45N LON 40W-110W), Африканский (LAT 10S-20N LON 15W-45E), Индонезийский (LAT 10S-30N LON 100E-130E). Интервал дискретизации составлял 15 мин.

На рис. 4-5 приведены ряды интенсивности потоков вистлеров и грозовых разрядов, нормированные на максимальное за анализируемый период число событий для магнито-сопряженных точек.

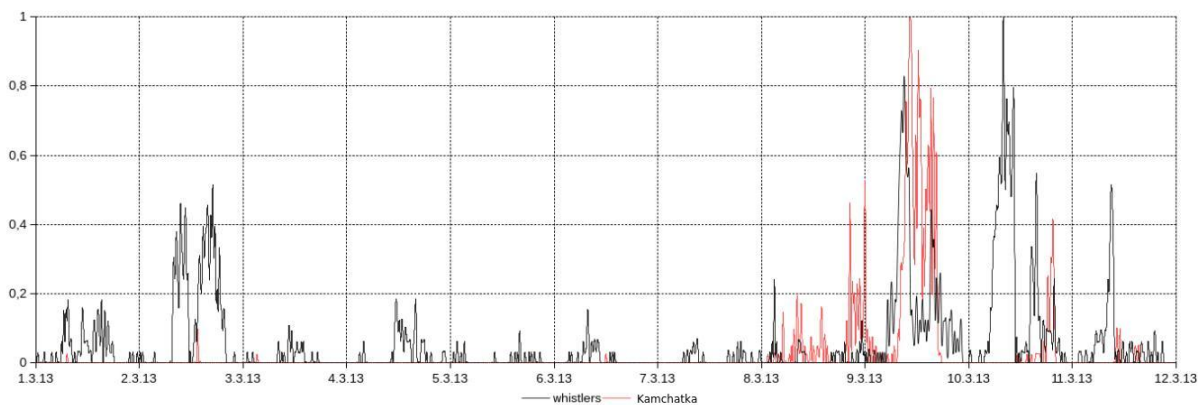


Рис. 4. Интенсивности вистлеров на Камчатке и грозовых разрядов на Камчатке

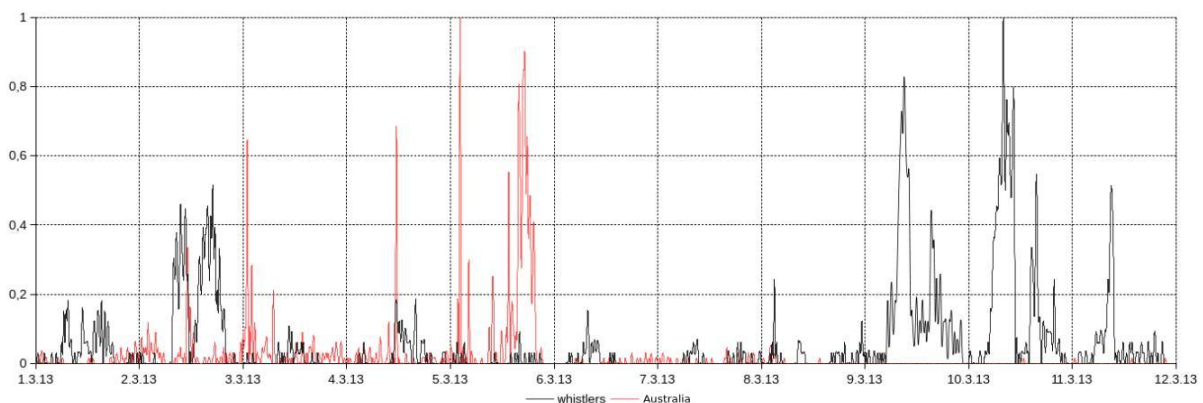


Рис. 5. Интенсивности вистлеров на Камчатке и грозовых разрядов в Австралии.

Визуальное сопоставление этих рядов показывает наличие определенной связи между потоками. Например, явно видна связь резкого увеличения интенсивности вистлеров 9 марта с камчатскими грозами. Дальнейший корреляционный анализ обнаружил всплеск числа вистлеров 2 марта, совпадающий с ростом интенсивности разрядов в Америке, Африке, Индонезии. Визуально отделить их затруднительно. Рассмотрим результаты расчета ранговой корреляции, представленные в табл.

Первый столбец содержит промежутки времени усиления потока вистлеров, а следующие – величину коэффициента корреляции между вистлерами и грозовыми разрядами в эти промежутки. Значимые уровни положительной корреляции выделены полужирным шрифтом, а через косую черту приведены уровни значимости, на которых отвергается гипотеза о некоррелированности.

Таблица

Ранговая корреляция между потоками вистлеров и грозовых разрядов

Дата, время	Камчатка	Америка	Африка	Индонезия	Австралия
01.03.13 5:45-9:15	0.25	0.37/0.2	-0.44	-0.35	-0.16
01.03.13 9:45-13:00	–	-0.64	0.42/0.15	0.06	-0.19
01.03.13 13:15-19:00	–	-0.31	-0.23	-0.38	-0.38
02.03.13 7:30-12:15	–	-0.54	-0.34	-0.34	-0.34
02.03.13 12:30-21:00	-0.06	0.24	0.62/0.0001	0.43/0.01	-0.28
03.03.13 8:00-15:00	–	0.06	0.06	-0.37	-0.05
04.03.13 10:45-20:30	–	-0.26	-0.61	0.18	0.35/0.03
05.03.13 14:30-22:00	–	-0.21	-0.05	0.23	0.34/0.1
06.03.13 5:30-14:00	-0.17	0.2/0.25	-0.08	-0.26	-0.3
08.03.13 2:15-5:15	0.05	-0.04	0.46/0.15	-0.62	0.11
09.03.13 4:45-13:45	0.08	-0.57	0.14	-0.65	–
09.03.13 14:15-23:15	0.57/0.0005	0.005	-0.34	0.26	0.06
10.03.13 4:00-13:00	-0.25	-0.47	0.29	-0.29	-0.17
10.03.13 13:15-22:15	0.42/0.01	0.02	0.14	0.09	–
11.03.13 5:00-11:30	-0.59	-0.36	0.56/0.005	0.09	–

Видно, что были значимые положительные корреляции потока вистлеров с грозовыми разрядами на Камчатке (9 и 10 марта), в Австралии (4 и 5 марта), в Американском очаге (1 и 6 марта), в Африканском очаге (1 и 2 и 8 и 11 марта). Всплески 3, 9 и 10 марта затруднительно привязать к одному из рассмотренных очагов, возможно их источники лежат в других областях.

Рассмотрим теперь результаты анализа для второго временного промежутка 1-31 сентября 2013 г.

Анализ проводился по методике, описанной в работе [17]. Поверхность Земли была разбита на области 3×3 градуса и для каждой из областей составлялся временной ряд L_t количества грозовых разрядов в 1 мин. Такой же временной ряд W_t составлялся для камчатских вистлеров. Далее рассчитывался коэффициент корреляции между рядами, округленными до булевских значений.

Гипотеза о нулевой корреляции по рассмотренным рядам при уровне значимости $\gamma = 0.05$ отвергается при выборочном значении корреляции 0.011. На рис. 6 приведено распределение значения коэффициента корреляции для тех элементов градусной сетки, где его величина превосходит границу значимости.

Из этого распределения видно, что рассматриваемый промежуток времени корреляции между камчатскими вистлерами и грозами в сопряженной точке в Австралии не наблюдалась. При этом можно говорить о корреляции между вистлерами и работой индонезийского и американского грозовых очагов.

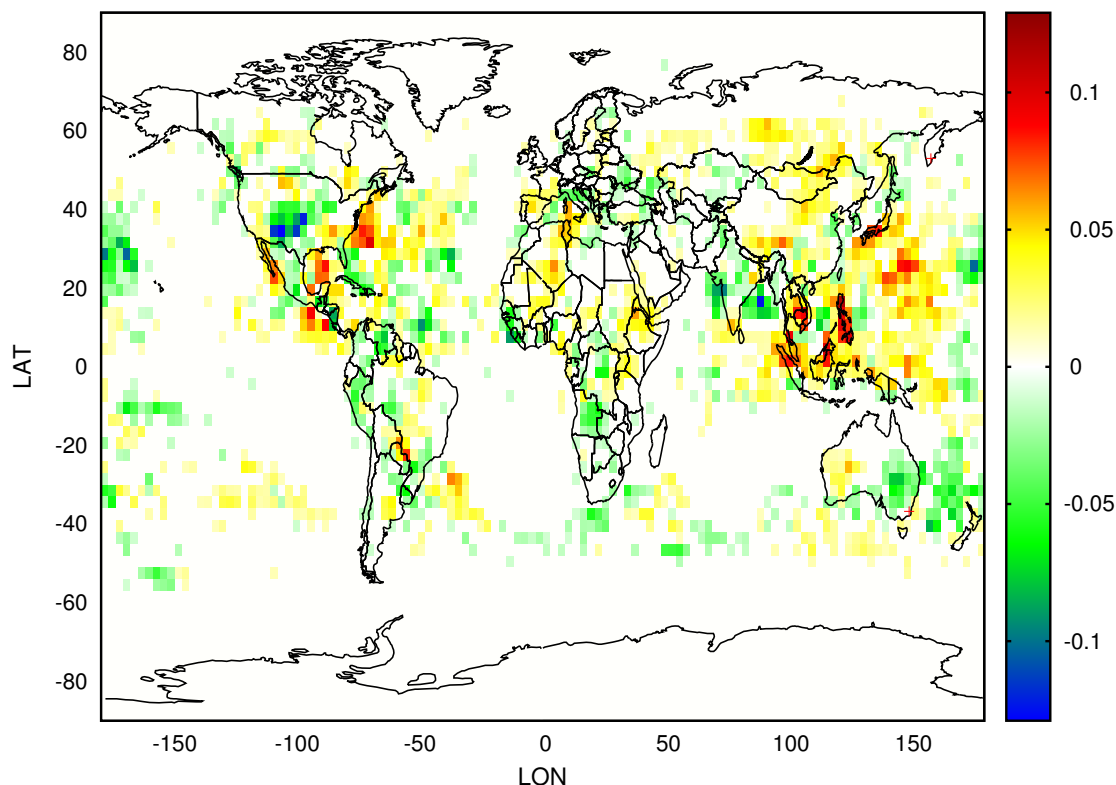


Рис. 6. Распределение коэффициента корреляции между рядом камчатских вистлеров и рядами грозных разрядов по градусной сетке 3×3 . Красными ромбами отмечено положение обсерватории на Камчатке (LAT 52.97N LON 158.25E) и магнитно-сопряженной точки в Австралии (LAT 36.77S LON 149.40E). Цвет ячейки соответствует значению коэффициента корреляции. В ячейках белого цвета корреляция не значима

Заключение

Анализ рядов интенсивности вистлеров в период 1-13 марта 2013 г. и 1-30 сентября 2013 г., зарегистрированных на Камчатке, показал, что регистрируемые сигналы могут иметь грозные источники как из "камчатской" магнитной силовой трубки, так и из других областей. При этом камчатские и австралийские грозы не играли доминирующей роли, как это можно было ожидать. Возможным объяснением этому может быть то, что в рассматриваемые периоды интенсивности гроз в американском, африканском и индонезийском очагах была значительно выше, чем в Австралии и, тем более, на Камчатке.

Работа выполнена при поддержке 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. Storey L. R. O. An investigation of whistling atmospherics // Philos. Trans. R. Soc. London A. 1953. Vol. 246(908). P. 113-141. doi:10.1098/rsta.1953.0011.

3. Helliwell R.A. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena. Stanford, Calif: Stanford Univ. Press, 1965.
4. Strangeways H.J., Rycroft M.J. Trapping of whistler-waves through the side of ducts // J. Atmos. Terr. Phys. 1980. Vol. 42(11-12). P. 983-994. doi: 10.1016/0021-9169(80)90112-9.
5. Strangeways H.J. Whistlers leakage from narrow ducts // J. Atmos. Terr. Phys. 1986. Vol. 48(5). P. 455-462. doi: 10.1016/0021-9169(86)90122-4.
6. Rao M., Somayajulu V.V., Dikshit S.K., Tantry A.P. Low-latitude cutoff for whistlers observed on the ground // J. Geophys. Res. 1974. Vol. 79(25). P. 3867-3869.
7. Throne R.M., Horne R.B. Landau damping of magnetospheric reflected whistlers // J. Geophys. Res. 1994. -Vol. 99(A9). P. 249-258.
8. Yoshino T. Low-latitude whistlers and cloud distributions in the conjugate area // J. Geophys. Res. 1976. Vol. 81(A25). P. 4793-4796.
9. Collier A.B., Hughes A.R.W., Lichtenberger J., Steinbach P. Seasonal and diurnal variation of lightning activity over Southern Africa and correlation with European whistlers observations // Ann. Geophys. 2006. Vol. 24(2). P. 529-542.
10. Rodger C.J., Werner S., Brundell J.B., Lay E.H., Thomson N.R., Holzworth R.H., Dowden R.L. Detection efficiency of the VLF World-wide Lightning Location Network (WWLLN): Initial case study // Ann. Geophys. 2006. Vol. 24(12). P. 3197-3214.
11. Dowden R.L. et al. World-wide lightning location using VLF propagation in the Earth-ionosphere waveguide // IEEE Antennas Propag. Mag. 2008. Vol. 50(5). P. 40-60. doi:10.1109/MAP.2008.4674710.
12. Abarca S.F., Corbosiero K.L., Galarneau Jr. T.J. An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // J. Geophys. Res. 2010. Vol. 115. D18206. doi:10.1029/2009JD013411.
13. Lichtenberger J., Ferencz C., Bodnár L., Hamar D., Steinbach P. Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Automatic Whistler Detector // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. A12201. doi:10.1029/2008JA013467.
14. Lichtenberger J. A new whistler inversion method // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. A07222. doi:10.1029/2008JA013799.
15. 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.
16. Чернева Н.В., Водинчар Г.М., Сивоконь В.П., Мельников А.Н., Санников Д.В., Агранат И.В. Корреляционный анализ потоков свистящих атмосфериков и грозовых разрядов // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2013. № 2(7). С. 59-67.
17. Collier A.B., Delpont B., Hughes A.R.W., Lichtenberger J., Steinbach P., Oster J., Rodger C.J. Correlation between global lightning and whistlers observed at Tihany, Hungary // J. Geophys. Res. 2009. Vol. 114. A07210. doi: 10.1029/2008JA013863.
18. Collier A.B., Bremner S., Lichtenberger J., Downs J.R., Rodger C.J., Steinbach P. Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin, New Zealand // Ann. Geophys. 2010. Vol. 28(2). P. 499-513.
19. Айвазян С.А., Юнюков И.С., Мешалкин Л.Д. Прикладная статистика. Исследование зависимостей. М.: Финансы и статистика, 1985.

Поступила в редакцию / Original article submitted: 15.10.2014