УДК 537.8

СВИСТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ В ПЕРИОДЫ ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ*

Ю. М. Михайлов¹, О. В. Капустина¹, Г. И. Дружин²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук, 108840, Россия, г. Москва, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, 684034, Россия, Камчатский край, Елизовский район, с.Паратунка, ул. Мирная, 7.

E-mail: yumikh@izmiran.ru

Представлены результаты наблюдений активности свистов в обл. Карымшина (Камчатка) в период ноябрь-декабрь 2008 г. Этот период характеризовался превышением значений f_0F_2 и уменьшением hF_2 по сравнению с обычным уровнем. Наиболее отчетливо этот эффект наблюдался в Иркутске, однако проявлялся и на Камчатке, хотя был выражен слабее. Такое событие объясняют [4] как изменением состава термосферы, так и возникновением западной составляющей электрического поля и градиента электронной концентрации в максимуме возмущений. Последнее также связывают с изменением направления северной компоненты межпланетного магнитного поля [4]. В обычных условиях показатель преломления ОНЧ-волн в дневных условиях выше, чем в ночных [7], а число свистов, напротив, ночью выше, чем днем. 18-19 декабря на Камчатке наблюдалось появление свистящих атмосфериков (СА) днем в таком же количестве, как и ночью, порядка 10 1/мин. В то же время в периоды, следующие за максимумом изменения характеристик ионосферы (23, 24, 27, 29, 30 декабря), наблюдалось резкое возрастание количества свистов в дневное время до ~ 50 1/мин. Возможно, что в данном случае источником свистов являлись атмосферные разряды, инициируемые в тайфуне, который наблюдались вблизи сопряженной области в южном полушарии. Увеличение числа свистов связано с изменением условий захвата на силовой линии $L = 2,4$.

Ключевые слова: вистлеры, магнитное поле, электромагнитное излучение, ионосфера

© Михайлов Ю. М. Капустина О. В. Дружин Г. И., 2019

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ № 19-05-00543

Введение

Регулярные исследования свистов были начаты в 60-х годах прошлого столетия Хелливэллом [1]. Он показал богатые возможности свистов как средства изучения свойств ионосферы. Эти исследования были продолжены Ласпером и др. [2], которые провели пятилетние исследования свистов вдоль меридиана Земли от Лабрадора до Антарктики. Были выявлены такие свойства свистов, как ночной максимум их появления, связь с геомагнитной активностью на высоких широтах, летний максимум на 6:00 и 18:00 (LT). Целью исследований ОНЧ-излучений ИЗМИРАН, начатых в содружестве с ИКИР с 2001 г. было, в частности, уточнение свойств свистов в Дальневосточном и Тихоокеанском регионах, а также выявление возможностей свистов в части диагностики ионосферы в указанных регионах.

Аппаратура и методика измерений

Для регистрации ОНЧ-сигналов использовалась аппаратура АНЧ-2МЕ [3] в комплексе с АЦП и ПК. Аппаратура была соединена с антенной и обеспечивала регистрацию одной или двух магнитных компонент электромагнитного поля в широкой полосе частот от 20 Гц до 20 кГц в течение 1 мин в начале каждого часа. Аналоговый сигнал через АЦП записывался на диск с шагом по времени $dt = 20$ мкс. На цифровой спектрограмме одноминутной записи подсчитывалось количество свистов. Графики зависимости числа свистов от времени, полученные в 2002 и 2004 гг., представлены на рис. 1(а,б).

Рис. 1. Зависимость количества зарегистрированных свистов от времени; а – 2002 г.; б – 2004 г.

Далее подробно анализируются данные, полученные в декабре 2008 г. На рис. 2(а) показана зависимость числа свистов от времени, а на рис. 2(б) – цифровая спектрограмма в местный полдень 23.12.08 (00UT).

Рис. 2. (а) – Зависимость количества зарегистрированных свистов от времени в декабре 2008 г.; (б) – спектрограмма минутного интервала с началом 00:00 23.12.2008 UT.

В это время на ст. Иркутск был зарегистрирован аномальный рост (рис. 3) критической частоты f_0F_2 , при значительном уменьшении высоты hF_2 в условиях, когда значительные изменения магнитного и электрического полей, а также солнечной активности отсутствовали. Такие события объясняют авторы работы [4] как изменением состава термосферы, так и возникновением западной составляющей электрического поля, градиента электронной концентрации, а также изменением направления северной компоненты межпланетного магнитного поля. Их было принято характеризовать изменчивостью параметров в условиях спокойной ионосферы. Этот эффект проявлялся и на Камчатке, хотя был выражен слабее, а в южном полушарии подоб-

ная аномалия не наблюдалась.

Рис. 3. Характеристики ионосферы; тонкая линия – это усредненные значения h_m и N_m в спокойное время

В периоды, следующие за максимумом изменения характеристик ионосферы, 23, 24, 27, 29, 30 декабря наблюдалось резкое возрастание количества свистов в дневное время до ~ 50 1/мин. Возможно, что в данном случае источником свистов являются атмосферные разряды, инициируемые в тайфуне Billy, который наблюдался вблизи сопряженной области в южном полушарии. Как это было показано исследованиями в Карибском бассейне [5], тайфун порождает множество электрических импульсов (до нескольких десятков в секунду). Интенсивность некоторых достигает

Рис. 4. Результаты модельных расчетов критической частоты f_oF_2 , вблизи пунктов Иркутск, Карымшина и Брисбен

~ 20 мВ/м, что позволяет им распространяться в виде свистов. Свойства электрических полей грозового происхождения, наблюдаемых на спутнике Интеркосмос-

24 во время действия тайфунов, подробно исследовались в работе [6]. Ионосферные данные других станций, близких к ст. Карымшина, а также к сопряженной точке, носят фрагментарный характер и не позволяют восстановить полную картину эффекта. Однако мы воспользовались результатами модельных расчетов параметров ионосферы, выполненных в ИЗМИРАН на основе данных многих станций (<http://www.izmiran.ru/services/iweather/daily/>) для сравнения суточного хода f_oF_2 вблизи пунктов Иркутск, Карымшина и Брисбен (рис. 4).

Предшествующий анализ ОНЧ-явлений базировался на магнито-ионной теории. Эта теория предполагает распространение сигналов в однородной среде с равным количеством положительных и отрицательных зарядов. Равенство зарядов фигурирует у Хелливелла [1], как одно из условий распространения свистов. Такое предположение явно не подходит для интерпретации явления в декабре 2008 г. Прежде всего посмотрим, как проявляется иркутский эффект на ст. Карымшина и в сопряженной области вблизи п. Брисбен (рис. 4). Наиболее явно эффект выражен 23–24.12.2008, когда отношение дневного и ночного значений f_oF_2 равно 1.18–1.6. Это означает, что эффект на Камчатке запаздывает на 6–7 суток относительно Иркутска. В южном полушарии эффект практически не просматривается.

Рис. 5. Спектрохронограмма фрагмента цифрового сигнала полученного : (а) ночью 19.12.2008 12:00 UT; (б) днём 19.12.2008 00:00 UT

В работе [1] содержится огромное количество иллюстраций экспериментальных наблюдений свистов в разное время суток. Как правило, наибольшие группы свистов

наблюдались в вечернее время. В работе [7] показано, что у дневных свистов показатель преломления выше, чем у ночных. В интервале 18–21 декабря число свистов днем и ночью примерно одинаково $\sim 10/\text{мин}$, но 23–24 резко возрастает количество дневных свистов (рис. 2). Свисты, наблюдаемые в п. Карымшина, относятся к “one-hop whistlers” в классификации Хелливелла [1], т.е. их источники находятся в южном полушарии. Сопряженная область находится у восточного побережья Австралии (магнитная долгота $\sim 120^\circ$, магнитная широта $\sim 46^\circ$).

На рис.5 приведены примеры фрагментов ночной (19.12.08, 12:00 UT – а) и дневной (19.12.08, 00:00 UT - б) спектрограмм. В ночное время активность ОНЧ-излучений значительно выше, чем в дневное, а количество свистов примерно одинаково. Эти свисты были обработаны по программе, алгоритм которой описан в работе [8]. Эта программа дает хорошую сходимость, если распространение следует согласно магнитоионной теории. В данном случае удалось оценить параметры плазмы в вершине силовой линии ($L \sim 3$, $N = 255 \text{ см}^{-2}$) и на высоте 1000 км ($N = 2.5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$), что вполне согласуется с выполненными ранее наблюдениями. На рис. 7 приведены примеры обработки свиста, зарегистрированного в спокойный период 12.10.2002 в 00:00 и 05:00 LT.

Рис. 6. Спектрохронограмма фрагмента цифрового сигнала полученного 19.12.2008 00:00 UT, в развернутом масштабе по времени.

На рис. 2 приведена дневная спектрограмма 23.12.08, 00UT с разрешением по времени $\Delta T = 60 \text{ мс}$ (а) и на рис. 6 - ее фрагмент с $\Delta T = 10 \text{ мс}$. На спектрограмме видно необычно большое количество свистов. Большинство следуют группами, состоящими из одинаковых следующих друг за другом сигналов. Согласно классификации Хелливелла, мы бы отнесли их к “multiflesh-whistlers”, что можно перевести как “пучок” или “связка” свистов, т.к. их траектории близки, но они могут иметь разные, хотя и близкие источники. Некоторые сигналы из этой “связки” име-

ют довольно высокую дисперсию ($D_0 > 100^{-1/2}$) и в соответствии с классификацией Хелливелла можно сказать, что эти сигналы ближе к триггерным.

Рис. 7. Примеры обработки 12.10.2002 в 00:00 LT (а) и в 05:00 LT (б).

Заключение

Основные результаты работы заключаются в следующем:

- 1) Обнаружена высокая активность дневных свистов, более 50 1/мин.
- 2) Свисты часто группируются в пучковые образования, в которые входят компоненты от различных источников и с разной дисперсией.
- 3) Предполагается, что источником аномальной активности свистов является тайфун Billy в Юго-западной акватории Тихого океана.

Авторы благодарны В.М.Пухову за участие в измерениях.

Список литературы/References

- [1] Helliwell R., "Whistlers and Related Ionospheric Phenomena.", *Stanford University Press.*, 1960.
- [2] Laasperre T.A., Morgan M.G., Jonson W.G., "Some results of five Years of Whistler observation from Labrador to Antarctica", *Proc. IEEE.*, **April** (1963), 554–568.
- [3] Воробьев О.В., В.В.Коробовкин, Лихтер Я.И., Михайлов Ю.М., Соболев Я.П., Войта Я., Хорват И., "Дифракционные эффекты коротких волн", *ИЗМИРАН*, 1981, 173–192. [Vorob'yev O.V., Korobovkin V.V., Likhter YA.I., Mikhaylov YU.M., Sobolev YA.P., Voyta Y.A., Khorvat I., "Difraktsionnyye efekty korotkikh voln", *IZMIRAN*, 1981, 173–192, (in Russian)].
- [4] Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А, Пирог О.М., Полех Н.М., "Очень сильные увеличения электронной концентрации в максимуме слоя зимней ночной ионосферы над Иркутском", *Геомагнетизм и аэрoномия*, **51:3** (2011), 360–367. [Deminov M.G., Deminova G.F., Zherebtsov G.A, Pirog O.M., Polekh N.M., "Ochen' sil'nyye uvelicheniya elektronnoy kontsentratsii v maksimume sloya zimney nochnoy ionosfery nad Irkutskom", *Geomagnetizm i aeronomiya*, **51:3** (2011), 360–367, (in Russian)].
- [5] Sobolev Ya.P., Mikhailov Yu.M., "Typhoon in Caribian region registered on satellites in VLF band", *Pros. of second INDO-Russian symposium*, 28-31 July 1971, Moscow., 1971, 230-233.

- [6] Mikhailova G.A., Mikhailov Yu.M., Kapustina O.V., "ULF-VLF Electric Fields in the External Ionosphere Over Powerful Typhoons in Pacific Ocean", *Geomagnetism and aeronomy*, **2**:1 (2000), 153–158.
- [7] Strangeways H. S., "Investigation by ray tracing of the effect of a summer-winter asymmetry on whistler ducting", *Atmospheric and Terrestrial Physics*, **44**:10 (1982), 889–899.
- [8] Tarcsai G., "Routine whistler analysis by means of accurate curve fitting", *Atmospheric and Terrestrial Physics*, **37** (1975), 1447–1457.

Список литературы (ГОСТ)

- [1] Helliwell R. Whistlers and Related Ionospheric Phenomena. Stanford University Press. 1960.
- [2] Laasperre T.A., Morgan M.G., Jonson W.G. Some results of five Years of Whistler observation from Labrador to Antarctica // Proc. IEEE. 1963. pp. 554–568.
- [3] Воробьев О.В., В.В.Коробовкин, Лихтер Я.И., Михайлов Ю.М., Соболев Я.П., Войта Я., Хорват И. Дифракционные эффекты коротких волн // ИЗМИРАН. 1981. С. 173–192.
- [4] Деминов М.Г., Деминова Г.Ф., Жеребцов Г.А, Пирог О.М., Полех Н.М. Очень сильные увеличения электронной концентрации в максимуме слоя зимней ночной ионосферы над Иркутском // Геомагнетизм и аэронаука. 2011. Т. 51. №3. С. 360–367.
- [5] Sobolev Ya.P., Mikhailov Yu.M. Typhoon in Caribian region registered on satellites in VLF band // Pros. of second INDO-Russian symposium. 28-31 July 1971. Moscow. pp. 230-233.
- [6] Mikhailova G.A., Mikhailov Yu.M., Kapustina O.V. ULF-VLF Electric Fields in the External Ionosphere Over Powerful Typhoons in Pacific Ocean // Geomagnetism and aeronomy. 2000. vol. 2. no. 1. pp. 153–158.
- [7] Strangeways H. S. Investigation by ray tracing of the effect of a summer-winter asymmetry on whistler ducting // Atmospheric and Terrestrial Physics. 1982. vol. 44. no. 10. pp. 889–899.
- [8] Tarcsai G. Routine whistler analysis by means of accurate curve fitting // Atmospheric and Terrestrial Physics. 1975. vol. 37. pp. 1447–1457.

Для цитирования: Михайлов Ю. М. Капустина О. В. Дружин Г. И. Свистовые характеристики в периоды возмущений ионосферы // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2019. Т. 29. № 4. С. 173-181. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-173-181

For citation: Mikhailov Yu.M., Kapustina O.V., Drugin G.I. Whistling characteristics during periods of ionospheric disturbances, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*. 2019, **29**: 4, 173-181. DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-173-181

Поступила в редакцию / Original article submitted: 01.11.2019

DOI: 10.26117/2079-6641-2019-29-4-173-181

MSC 83C50

WHISTLING CHARACTERISTICS DURING PERIODS OF IONOSPHERIC DISTURBANCES¹

Yu. M. Mikhailov¹, O. V. Kapustina¹, G. I. Drugin²

¹ Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Propagation N.V. Pushkova Russian Academy of Sciences, 108840, Russia, Moscow, Troitsk, Kaluga highway, 4.

² Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 684034 Russia, Kamchatka region, Elizovskiy district, Paratunka, Mirnaya str., 7.

E-mail: yumikh@izmiran.ru

The results of observations of whistlers in obs. Karymshina (Kamchatka) in the period November-December 2008 are presented. This period was characterized by an excess of f_0F_2 values and a decrease in hF_2 compared to the usual level. This effect was most clearly observed in Irkutsk, however, it also manifested itself in Kamchatka, although it was less pronounced. Such an event is explained [4] by both a change in the composition of the thermosphere and the appearance of the western component of the electric field and the electron concentration gradient at the maximum of disturbances. The latter is also associated with a change in the direction of the northern component of the interplanetary magnetic field [4]. Under normal conditions, the refractive index of VLF waves in daytime conditions is higher than at night [7], and the number of whistlers, on the contrary, is higher at night than during the day. On December 18-19, the appearance of whistling atmospherics in the daytime was observed in Kamchatka in the same amount as at night, about 10 1/min. At the same time, in the periods following the maximum changes in the ionosphere characteristics (23, 24, 27, 29, 30 December), there was a sharp increase in the number of whistles in the daytime to ~ 50 1/min. It is possible that in this case the source of whistles were atmospheric discharges initiated in a typhoon, which were observed near the conjugate region in the southern hemisphere. The increase in the number of whistlers is associated with a change in the conditions of capture on the force line $L = 2.4$.

Key words: whistlers, magnetic field, electromagnetic radiation, ionosphere.

© Mikhailov Yu. M., Kapustina O. V., Drugin G. I., 2019

¹This work was partially supported by the Russian Foundation for Basic Research No. 19-05-00543