

РЕЗКОЕ ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТНОГО ИНТЕРВАЛА РСС ВО ВРЕМЯ СУББУРИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ОБСЕРВАТОРИИ БАРЕНЦБУРГ

Н.В. Семенова (Полярный геофизический институт КНЦ РАН)

Введение

С 2002 г. Полярный геофизический институт КНЦ РАН ведет непрерывную регистрацию быстрых вариаций магнитного поля Земли в диапазоне 0.1-20 Гц в высокоширотной обсерватории Баренцбург (78,10° N, 14.14° E) на арх. Шпицберген. В регистрируемых спектрах часто наблюдаются равноудаленные по частоте усиления интенсивности шумового фона, которые называются резонансными структурами спектра (РСС). Наличие РСС объясняется теорией ионосферного альфвеновского резонатора (ИАР) [Поляков и Раппопорт, 1981]. Свойства РСС (частоты гармоник и расстояние между соседними гармониками (частотный интервал ΔF)) зависят только от параметров ионосферы над точкой наблюдения [Belyaev et al., 1990]. В частности,

$$\Delta F = \frac{c}{2n_a(l+h)}, \quad (1)$$

где h - толщина F-слоя ионосферы; l - масштаб спада электронной плотности в верхней ионосфере; $n_a \propto (M_{eff} * N_{emax})^{1/2}$, где M_{eff} и N_{emax} - эффективная масса ионов и электронная плотность в максимуме F-слоя.

На возможность наблюдения РСС оказывает влияние геомагнитная активность, в частности, суббури. По данным наблюдений в авроральной зоне было отмечено, что во время регистрации связанных с суббури геомагнитных пульсаций РСС исчезают. Это объясняется тем, что суббури сопровождаются высыпанием электронов, которые увеличивают проводимость E-слоя и уменьшают добротность ИАР [Yahnin et al., 2003]. В то же время, наблюдение РСС на высокоширотной станции Баренцбург не всегда означает развитие суббури вблизи станции. В работе [Семенова и др., 2008], рассматриваются 2 случая наблюдений РСС на фоне суббуревой активности. В одном из случаев, РСС наблюдаются во время пульсаций РiВ, в другом – исчезают вскоре после их начала. Было показано, что резонансные структуры исчезают, когда область высыпаний частиц и ионосферных токов, связанных с суббурей, распространилась до широты станции наблюдения. Если суббуря развивается на достаточно низких широтах (>200 км к экватору от станции), это не оказывает влияния на РСС даже во время пульсаций РiВ, которые регистрируются на высоких широтах благодаря распространению в ионосферном волноводе.

Еще один случай исследования изменений параметров РСС во время суббури описан в работе [Parent et al., 2010]. Наблюдения проводились в

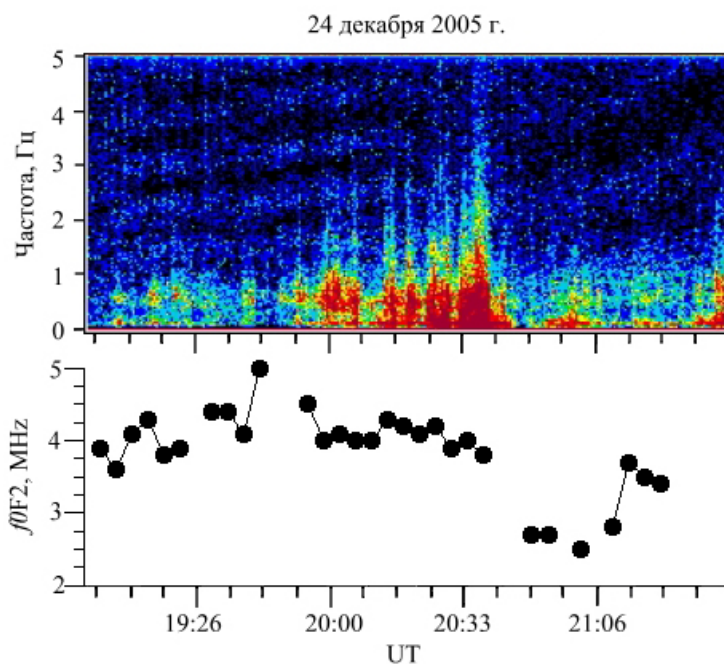


Рис. 1 Верхняя панель: спектрограмма флуктуаций геомагнитного поля в диапазоне 0.1-5 Гц для 19:00-21:40 UT 24 декабря 2005 г.; Нижняя панель: критическая частота f_0F2 полученная с помощью ионозонда, расположенного в Лонгйире для 24 декабря 2005 г.

Гаконе (Аляска, 62,39°N географической широты, L~5). Резонансная структура исчезла в момент начала суббури и появилась сразу после ее окончания спустя 3 часа. Суббуря начала развиваться поларнее станции Гакона. Экваториальная кромка диффузных сияний находилась на расстоянии приблизительно 120 км к полюсу от станции, когда РСС исчезла. Сияния постепенно сдвигались к экватору и захватили область над самой станцией. Спустя 3 часа, как только экваториальная кромка сияний сместилась к полюсу на 150 км, резонансная структура вновь появилась в шумовом фоне, а ее частотный интервал уменьшился почти в 2 раза. Проведенное в работе сравнение наблюдаемых характеристик РСС с вариацией критической частоты f_0F2 , измеренной с помощью дигизонда HAARP до и после суббури, показало качественное и количественное согласие с теорией

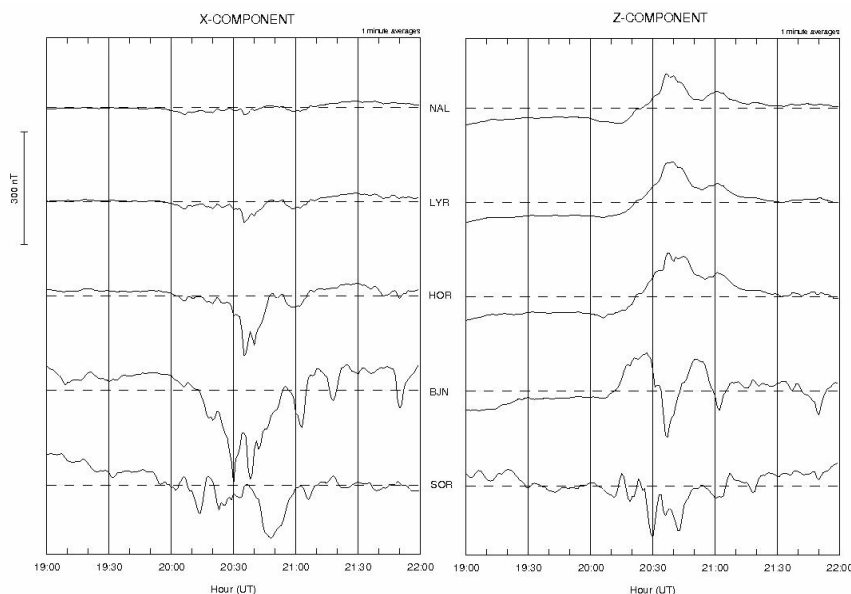


Рис. 2 Вариации X- и Z-компоненты магнитного поля в период 19:00-22:00 UT 24 декабря 2005 г. на нескольких высокоширотных станциях сети IMAGE

интервале 19:00-21:40 UT для 24 декабря 2005г. На спектрограмме видны РСС, частотный интервал которых составлял около 0.9 Гц в 20:18 UT. Около 20:40 UT прослеживается резкое изменение величины частотного интервала, который в 20:50 UT составил ~1.5 Гц. На спектрограмме также видны всплески геомагнитных пульсаций РiВ в интервале 19:45-20:40 UT, что указывает на наличие суббури. Тот факт, что наблюдения РСС продолжались во время развития суббури, указывает на то, что область, где происходят интенсивные высыпания частиц, была достаточно удалена от Баренцбурга [Семенова и др., 2008]. Данные наземных магнитометров цепочки станций сети IMAGE (рисунок 2) подтверждают, что центр суббурового электроджета не распространился полярнее станции Хорсун (HOR).

Суббуря проявилась и в оптических наблюдениях на станции Баренцбург в виде вспышек и распространения к полюсу дискретных сияний. По данным камеры всего неба было рассчитано положение полярных сияний относительно станции Баренцбург (рисунок 3). При расчете высота нижнего края дуг принималась равной 110 км. На рисунке 3 жирной линией на графике обозначена граница авроральной выпуклости. Внизу рисунка показаны кадры камеры всего неба для четырех моментов времени 20:16 UT,

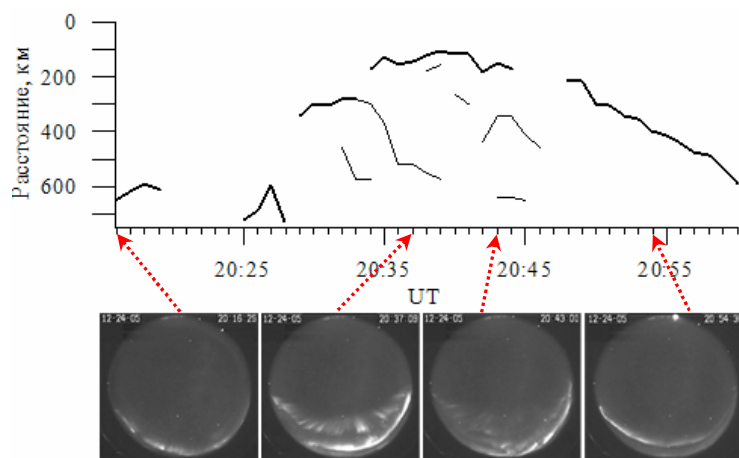


Рис. 3 Вверху: Положение дискретных сияний связанных с суббурей относительно станции Баренцбург для 24 декабря 2005 г.

Внизу: изображения полярных сияний, полученные с помощью ТВ камеры всего неба в Баренцбурге, для четырех моментов времени.

ИАР. Из этих наблюдений можно сделать вывод, что электронная плотность в F-слое является ключевым параметром для определения собственных частот и частотного интервала РСС, а возможность регистрации РСС определяется также состоянием E-слоя.

В данной работе мы также рассмотрим случай изменения параметров РСС во время пульсаций РiВ на высокоширотной станции и попытаемся понять причину такого изменения.

Результаты наблюдений

На верхней панели рисунка 1 показана спектрограмма вариаций магнитного поля в обс. Баренцбург в частотном диапазоне 0.1-5 Hz в

интервале 19:00-21:40 UT для 24 декабря 2005г. На спектрограмме видны РСС, частотный интервал которых составлял около 0.9 Гц в 20:18 UT. Около 20:40 UT прослеживается резкое изменение величины частотного интервала, который в 20:50 UT составил ~1.5 Гц. На спектрограмме также видны всплески геомагнитных пульсаций РiВ в интервале 19:45-20:40 UT, что указывает на наличие суббури. Тот факт, что наблюдения РСС продолжались во время развития суббури, указывает на то, что область, где происходят интенсивные высыпания частиц, была достаточно удалена от Баренцбурга [Семенова и др., 2008]. Данные наземных магнитометров цепочки станций сети IMAGE (рисунок 2) подтверждают, что центр суббурового электроджета не распространился полярнее станции Хорсун (HOR).

Суббуря проявилась и в оптических наблюдениях на станции Баренцбург в виде вспышек и распространения к полюсу дискретных сияний. По данным камеры всего неба было рассчитано положение полярных сияний относительно станции Баренцбург (рисунок 3). При расчете высота нижнего края дуг принималась равной 110 км. На рисунке 3 жирной линией на графике обозначена граница авроральной выпуклости. Внизу рисунка показаны кадры камеры всего неба для четырех моментов времени 20:16 UT, 20:37 UT, 20:43 UT, 20:54 UT. С 20:16 UT наблюдается появление ярких дуг на южном горизонте. После появления лучистой дуги в 20:29 UT авроральная выпуклость начинает быстро расширяться к полюсу. На кадрах и на графике видно несколько активных дуг после 20:30 UT. К 20:39 UT расширение выпуклости к полюсу закончилось. В этот момент было зарегистрировано минимальное удаление авроральной выпуклости, которое составило 100 км. Это повлекло за собой кратковременное исчезновение РСС. К 20:46 UT сияния затухают. В 20:48 UT образуется новая дуга, на расстоянии 180 км от зенита. Ее полярная граница быстро сдвигается к экватору. В это время на спектрограмме мы видим появление резонансных структур, но с другим частотным интервалом. Такое изменение частотного интервала может

быть связано с резким изменением ионосферных параметров. На нижней панели рисунка 1 приведена критическая частота f_0F2 ионосферы, определенная по данным ионозонда, расположенного в Лонгйире (недалеко от Баренцбурга). Эти данные показывают резкое уменьшение критической частоты с 4.2 МГц до 2.7 МГц после ~ 20:40 UT. Поскольку критическая частота пропорциональна квадратному корню из электронной концентрации, это означает уменьшение электронной концентрации в максимуме F-слоя ионосферы над станцией.

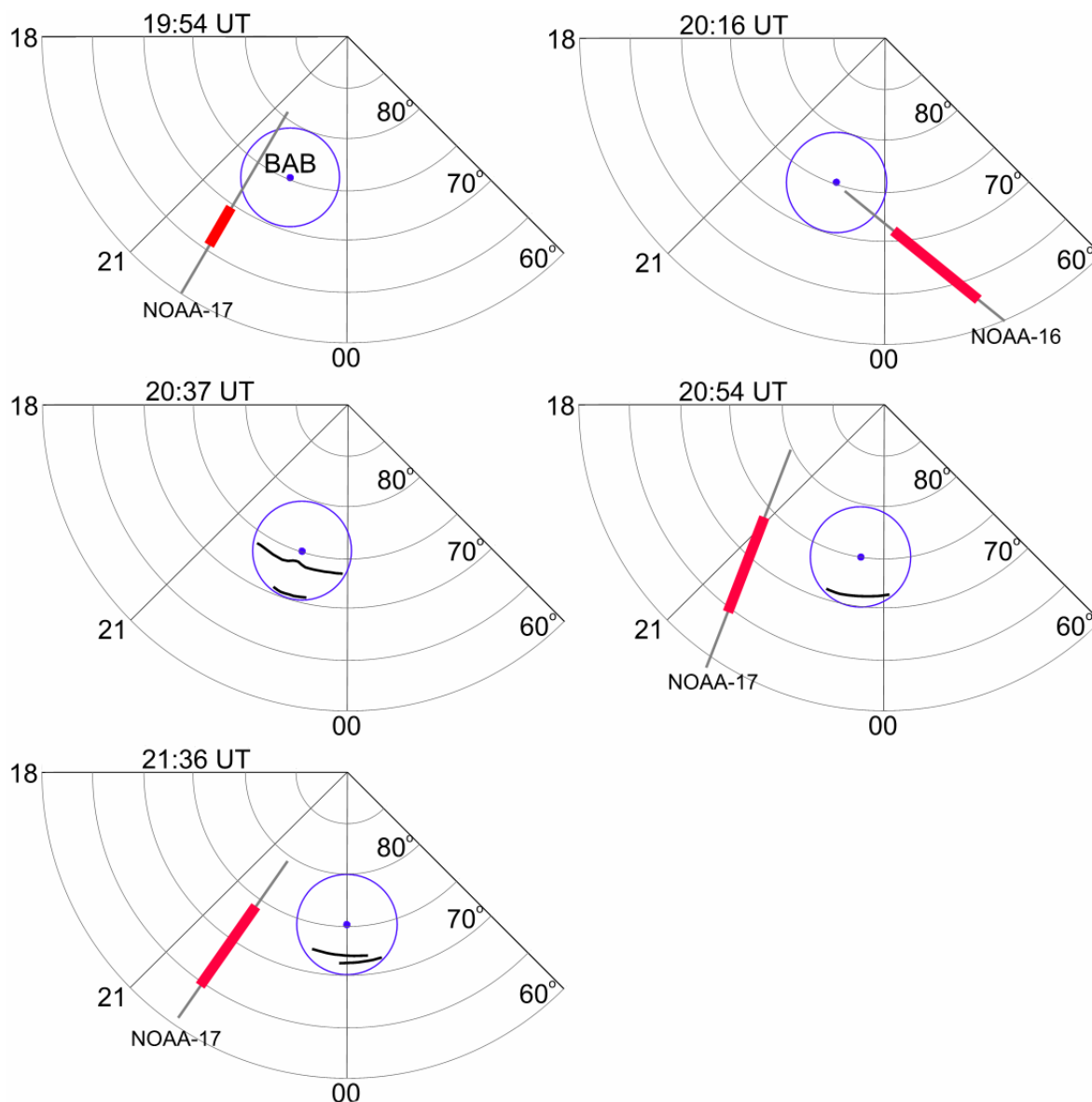


Рис. 4 Высыпания авроральных электронов по данным спутников NOAA-16, -17 и положение наблюдаемых дискретных сияний в Баренцбурге

Обсуждение

Из (1) следует, что отношение частотных интервалов, определенных в разное время, должно быть обратно пропорционально отношению критических частот над точкой наблюдения. Рисунок 1 показывает качественное согласие в поведении РСС и f_0F2 . Грубую (поскольку точно определить как ΔF из спектрограмм, так и f_0F2 из данных ионозонда трудно) количественную оценку можно сделать, сопоставив отношения этих параметров для моментов времени 20:18 UT и 20:50 UT. Отношение частотных интервалов составляет $\Delta F_{(20:18UT)} / \Delta F_{(20:50UT)} \sim 0.9/1.5 = 0.6$. Отношение критических частот составляет $f_0F2_{(20:50UT)} / f_0F2_{(20:18UT)} \sim 2.7/4.2 \sim 0.64$. Таким образом, наблюдаемые в этом событии изменения частотного интервала и критической частоты согласуются с теорией ИАР.

С чем может быть связано уменьшение концентрации в F-области при приближении авроральной выпуклости к широте Баренцбурга?

В работе [Titova et al., 2005] на основе анализа спутниковых наблюдений ОНЧ-волн и наблюдений полярных сияний был сделан вывод о наличии зоны втекающего тока к полюсу от зоны вытекающего тока, связанного с полярной границей авроральной выпуклости. Этот вывод согласуется с наблюдениями радиоавроры и электрических полей на полярной кромке дуг сияний в ночном секторе [см., Timofeev et al., (1987) и ссылки в этой работе]. В области втекающего тока ожидается вынос ионосферных электронов из F-области и образование зоны пониженной концентрации (так называемой, авроральной полости). Авроральная полость была обнаружена в экспериментах на радаре некогерентного рассеяния в Гренландии [Doe et al., 1993, 1995]. По данным работы [Doe et al., 1995] такая полоса пониженной концентрации может наблюдаться на 70° – 76° геомагнитной широты на границе между полярной шапкой и приполюсной кромкой авроральных высыпаний.

Для рассматриваемого события мы проанализировали потоки электронов над полярной областью, используя данные низкоорбитальных спутников NOAA-16, -17. Эти спутники оснащены приборами для измерения частиц с энергией < 20 кэВ (прибор TED). На рисунке 4 показаны зоны высыпаний электронов (черный прямоугольник) во время последовательных пролетов спутников NOAA-16, -17 (тонкая линия); точкой в окружности обозначено положение станции Баренцбург. Поле зрения камеры всего неба в Баренцбурге обозначено окружностью радиусом ~ 500 км. Из рисунка видно, отсутствие заметных потоков высыпавшихся частиц в ночном секторе на широтах выше 70° геомагнитной широты до суббури (19:54 UT на рисунке 4). По-видимому, в это время станция находилась в полярной шапке. Во время суббури данные спутников показывают расширение зоны высыпаний к полюсу (в соответствии с наблюдениями полярных сияний). Согласно измерениям со спутников полярная граница зоны высыпаний достигла широты $\sim 73.5^{\circ}$. Это согласуется с определением максимальной широты полярной кромки сияний, которые в $\sim 20:39$ UT находились примерно в ~ 100 км к югу от Баренцбурга. Интересно, что эта граница высыпаний (“новая” граница полярной шапки) остается примерно на той же самой широте и после 21 UT, когда сияния в этой области уже погасли, и авроральная активность наблюдалась существенно южнее.

Широтная протяженность области пониженной концентрации на границе между авроральной зоной и полярной шапкой может составлять 20–200 км [Doe et al., 1993]. После $\sim 20:40$ UT обсерватория Баренцбург, по-видимому, оказалась в области пониженной концентрации, связанной с втекающим током к полюсу от полярной кромки высыпаний из плазменного слоя. Это и привело к наблюдаемому «скачку» спектрального интервала РСС.

Список литературы

- Поляков С.В., Рапопорт В.О. Ионосферный альфвеновской резонатор//Геомагнетизм и аэрономия. Т. 21. № 5. С. 610–614, 1981.
- Семенова Н.В., Яхнин А.Г., Васильев А.Н., Амм О. Особенности резонансных структур в спектрах УНЧ электромагнитного шума в высоких широтах (обс. Баренцбург)// Геомагнетизм и аэрономия. Т. 48. № 1. С. 40–48, 2008
- Belyaev P.P., Polyakov S.V., Rapoport V.O., Trakhtengerts V.Y. The ionospheric Alfvén resonator // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 52. № 9. P. 781–788, 1990.
- Doe R. A., Mendillo M., Vickrey J. F., Zanetti L. J., Eastes R. W. Observations of nightside auroral cavities // J. Geophys. Res. V. 98. № A1. P. 293–310. doi:10.1029/92JA02004, 1993.
- Doe R.A., Vickrey J.F., and Mendillo M. Electrodynamical model for the formation of auroral ionospheric cavities // J. Geophys. Res. V. 100. № A6. P. 9683–9696, 1995.
- Parent A., Mann I.R., Rae J. Effects of substorm dynamics on magnetic signatures of the ionospheric Alfvén resonator // J. Geophys. Res. V. 115 № A02312. doi:10.1029/2009JA014673, 2010.
- Timofeev E.E., M.K. Vallinkoski, T.V. Kozelova, A.G. Yahnin, R.J. Pellinen. Systematics of arc-associated electric fields and currents as inferred from radar backscatter measurements. J. Geophysics, 122–137, 1987.
- Titova E.E., Yahnin A.G., Santolik O., Gurnett D.A., Jiricek F., Rauch J.-L., Lefeuvre F., Frank L.A., Sigwarth J.B., and Mogilevsky M.M. The relationship between auroral hiss at high altitudes over the polar caps and the substorm dynamics of aurora // Ann. Geophys. V. 23. P. 2117–2128, 2005.
- Yahnin A.G., Semenova N.V., Ostapenko A.A., Kangas J., Manninen J., Turunen T. Morphology of the Spectral Resonance Structure of the Electromagnetic Noise in the Range of 0.1–4 Hz at L = 5.2 // Ann. Geophys. V. 21. P. 779–786, 2003.