

УДК 550:385.4

ЭФФЕКТЫ МАГНИТНОЙ БУРИ 29–31 ОКТЯБРЯ 2003 г. НА СРЕДНЕШИРОТНЫХ КВ-РАДИОТРАССАХ (ПО ДАННЫМ ДОПЛЕРОВСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ)

© 2004 г. В. В. Бочкарев, И. Р. Петрова, В. Ю. Теплов

Казанский государственный университет

Поступила в редакцию 20.06.2004 г.

В статье приводятся результаты спектрального анализа сигнала наклонного зондирования ионосферы, полученного на доплеровском фазоугломерном комплексе Казанского университета во время геомагнитной бури 29–31.X.2003 г. На коротковолновых радиотрассах различной ориентации наблюдались интенсивные вариации доплеровского сдвига частоты, превосходящие на порядок, а кратковременно – на два порядка вариации в дни без магнитных возмущений. Для вариаций доплеровского сдвига в эти дни характерно преобладание относительно малых периодов (1–3.5 минуты). Следует отметить, что если для слабых геомагнитных возмущений отклик в форме искажений параметров КВ-радиосигнала наблюдается, как правило, только для трасс, приходящих из высокоширотных районов, то в данном случае были затронуты все радиотрассы.

Геомагнитная буря 29–31.X. вызвала значительные возмущения не только полярной, но и среднеширотной ионосферы. Проявления этих возмущений наблюдались в ходе измерений сигнала наклонного зондирования ионосферы на доплеровском фазоугломерном комплексе Казанского университета (широта 55° N49° E).

Измерительный комплекс представляет собой систему пространственно разнесенного приема с малой базой. В состав антенно-фидерной системы комплекса входят 4 антенны с вертикальной поляризацией и круговой диаграммой направленности в вертикальной плоскости, типа “вертикальный вибратор”. Антенны расположены по кругу диаметром 15.6 м. В качестве приемников в комплексе используются связанные КВ-приемники Р339 (диапазон 1–30 МГц).

Используется метод цифрового приема с аналоговым квадратурным разложением сигнала на низкой частоте, позволяющий определять фазовые и амплитудные характеристики при цифровой спектральной обработке в динамическом диапазоне до 70 дБ. Стабильность частотных параметров определяется стандартом частот Ч1-50 и составляет 10^{-11} (<0.001 Гц на частоте 10 МГц). Комплекс позволяет проводить измерения в режиме угломера (4 приемника настроены на одну частоту) или спектроанализатора (до 4 различных частот параллельно) [1, 2].

Измерения проводятся с использованием сигналов радиовещательных станций КВ-диапазона. Это позволяет исследовать различные по пространственной ориентации и длине трассы и расширить сетку принимаемых частот без затрат на организацию специальных пунктов радиоизлуче-

ния. Кроме того, с использованием сигналов вещательных КВ – станций удалось реализовать режим непрерывных многочасовых измерений, что позволяет исследовать долгопериодные вариации и суточный ход ионосферных параметров на трассах различной направленности.¹

На основе анализа экспериментальных данных, полученных на доплеровском фазоугломерном комплексе Казанского государственного университета за период 2001–2003 гг., исследовались периодические и квазипериодические колебания параметров ионосферного сигнала. Для дней осенне-зимнего периода с невысоким уровнем геомагнитной активности распределения периодов этих колебаний показывают наличие максимумов интенсивности колебаний с периодами от 5 мин и больше, что соответствует периодам внутренних гравитационных волн (ВГВ) на этих высотах. Распределение периодов вариаций доплеровского сдвига частоты в области малых масштабов носит степенной характер, что, по-видимому, соответствует турбулентным движениям. В среднем, размах вариаций не превышал 1 Гц. [3]

В конце октября 2003 г. имели место экстремально сильные магнитные бури. В предшествующие магнитным бурям дни активность волновых процессов была относительно невысокой, характерная величина среднеквадратического отклонения доплеровского сдвига составила 0.1 Гц, суточный размах доплеровских вариаций – порядка

¹ Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю., Шерстюков О.Н. Исследование волновых процессов в термосфере методом наклонного зондирования. <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/007/pdf>.

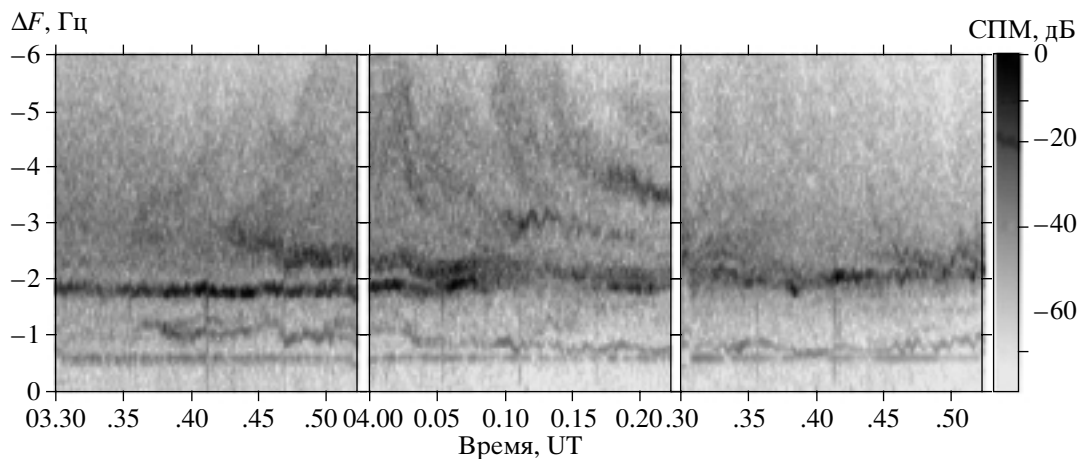


Рис. 1. Градациями серого цвета на всех рисунках показано изменение спектральной плотности мощности (СПМ).

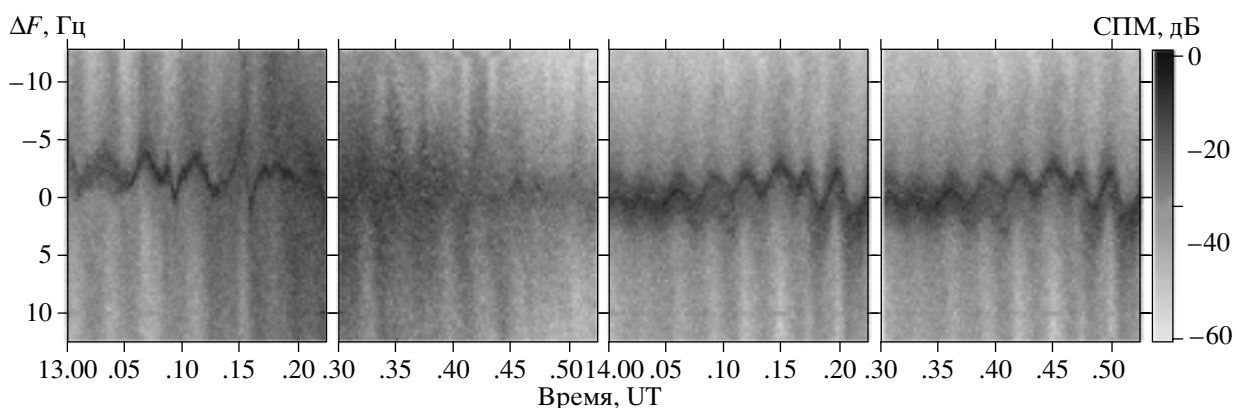


Рис. 2.

0.3 Гц. Преобразующие периоды вариаций составляли, как и обычно, 5 мин и более, что соответствует характерным периодам внутренних гравитационных волн.

Условия распространения КВ-радиоволн в дни магнитных бурь были очень сложными, что затрудняло проведение эксперимента по наклонному зондированию ионосферы. Полученные нами ряды измерений в эти дни имеют большие разрывы, обусловленные отсутствием сигнала станций КВ-диапазона, что, по видимому, связано с высоким поглощением в ионосфере. Однако, при обработке полученных экспериментальных данных удалось выявить некоторые интересные особенности в вариациях доплеровского сдвига частоты ионосферного сигнала.

Для построения приводимых далее доплеровских спектров использовался периодограммный метод Денбела и временное окно Кайзера [4, 5]. Временное разрешение приводимых данных составляет около 10 с. Частотное разрешение для данных условий составляет порядка 0.05 Гц.

На рис. 1 представлены спектры сигнала наклонного зондирования для трассы Архангельск–Казань (“Радио России”, частота 6160 кГц, длина трассы 1080 км) с 03.30 по 05.00 UT 29.X.2003 г. В начале данного периода сигнал имеет простую структуру: в нем доминирует одна зеркальная мода, размах доплеровских вариаций для нее составляет не более 0.05 Гц. Между 03.38 и 03.45 UT модовый состав сигнала усложняется, появляются компоненты, отстоящие на 1–2 Гц от основной моды, для них можно отметить наличие быстрых, с периодами около минуты, вариаций доплеровского сдвига с размахом 0.2–0.3 Гц. В последующие часы сигнал на частоте 6160 кГц практически не прослушивался из-за возросшего поглощения, и измерения на данной частоте были возобновлены только с 13 часов (здесь и далее время UT).

На рис. 2 приведены спектрограммы сигнала НЗ для трассы Архангельск–Казань (“Радио России”, частота 6160 кГц) с 13.00 по 15.00 UT, а на рис. 3 – отдельно наиболее интересный фрагмент

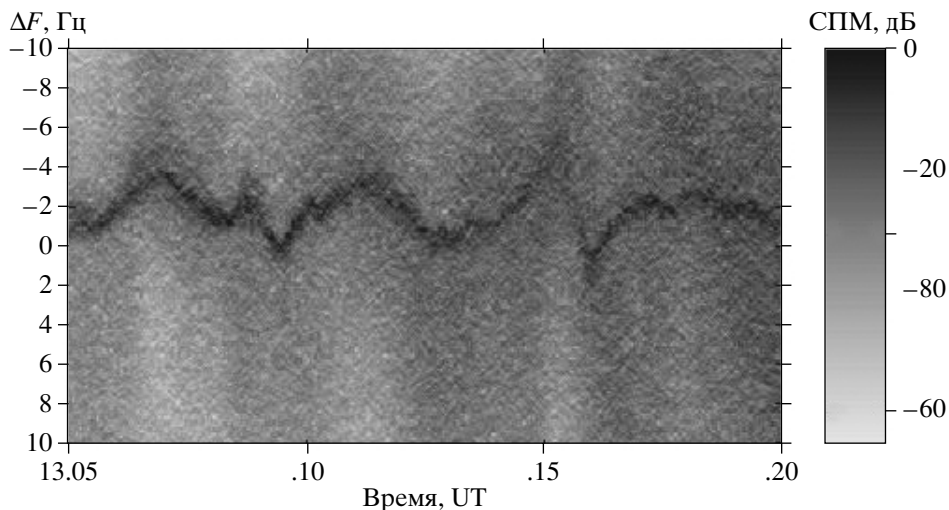


Рис. 3.

13.05–13.20 UT. Характерной особенностью данного возмущения является то, что помимо основной моды, в сигнале присутствует составляющая с широким (до 10 Гц) спектром, уровень которой всего на 12–15 дБ ниже, чем у основной моды. Причем доплеровский сдвиг рассеянной компоненты с широким спектром так же испытывает быстрые вариации с размахом более 10 Гц. Для интерпретации очень важен факт, что, как видно по рисунку, фаза вариаций основной и рассеянной мод не совпадают: это говорит о том, что мы имеем дело с волновым процессом, распространяющимся в пространстве. Большой (больше, чем на порядок превышающий характерные значения для дней с нормальной геомагнитной активностью) разброс значений доплеровских сдвигов говорит о большой величине области, охваченной возмущением (по меньшей мере, это сотни километров). Основной период вариаций доплеровского сдвига составляет около 3–3.5 мин, можно видеть так же присутствие вариаций с периодами около 1–1.5 мин. Зависимость доплеровского сдвига от времени, весьма далеко от гармонической; интересной чертой процесса является наличие резких скачков, по форме напоминающих фронт ударной волны.

Прохождение такого скачка отмечается в 13.16 UT, когда доплеровский сдвиг изменяется более чем на 8 Гц примерно за 40 сек. При интерпретации этих данных необходимо учитывать, что радиус первой зоны Френеля для данной трассы составляет около 5 км, а продольный размер области, где происходит отражение, может составлять около 50 км. Так как наиболее вероятное направление движения возмущения – с севера на юг, т.е., вдоль трассы, фазовая скорость возмущения должна была быть очень велика. После прохождения возмущения в течении 20–25 мин

сигнал преимущественно рассеянный, его ширина по уровню – 10 дБ превышает 25 Гц. По-видимому, это связано с образованием интенсивных неоднородностей в ионосферной плазме в результате прохождения возмущения.

С 15.30 29.X., а также 04.00–08.00 UT и 15.00–18.00 UT 30 и 31.X. регистрировался сигнал радиостанции “Радио Свобода”, 7220 кГц с передатчиков в г. Лампертхайм (Германия, 49N30, 08E30). Длина данной трассы составляет 2785 км.

В первой половине дня 30.X. K_p -индекс был относительно невысоким. Соответственно и спектральная структура сигнала для этого периода достаточно типична для данного сезона и трасс такой протяженности. (На рис. 4 приведены спектрограммы для периода 07.30–08.00 UT). Мы видим одну моду с узким спектром, вариации частоты которой незначительны, и вторую моду, для которой наблюдается наличие вариаций с периодами 5 и 20 мин. Таким образом, картина практически не отличается от того, что можно видеть в другие дни.

Вечером, с возрастанием K_p -индекса, картина меняется. После 16 часов для данной трассы, наряду с медленными вариациями, появляются вариации с периодом около минуты и размахом 0.2–0.4 Гц, наиболее интенсивные возмущения же наблюдались в период 16.35–17.15 UT 30.X. (рис. 4). Основной период наблюдаемых вариаций составляет 70–75 сек; размах колебаний доплеровского сдвига основной моды около 2 Гц. Так же, как и накануне для трассы Архангельск–Казань, наблюдается наличие составляющей с широким (до 6–7 Гц) спектром, размах колебаний которой до 5 Гц. После прохождения возмущения уровень сигнала упал. Наличие вариаций с периодами

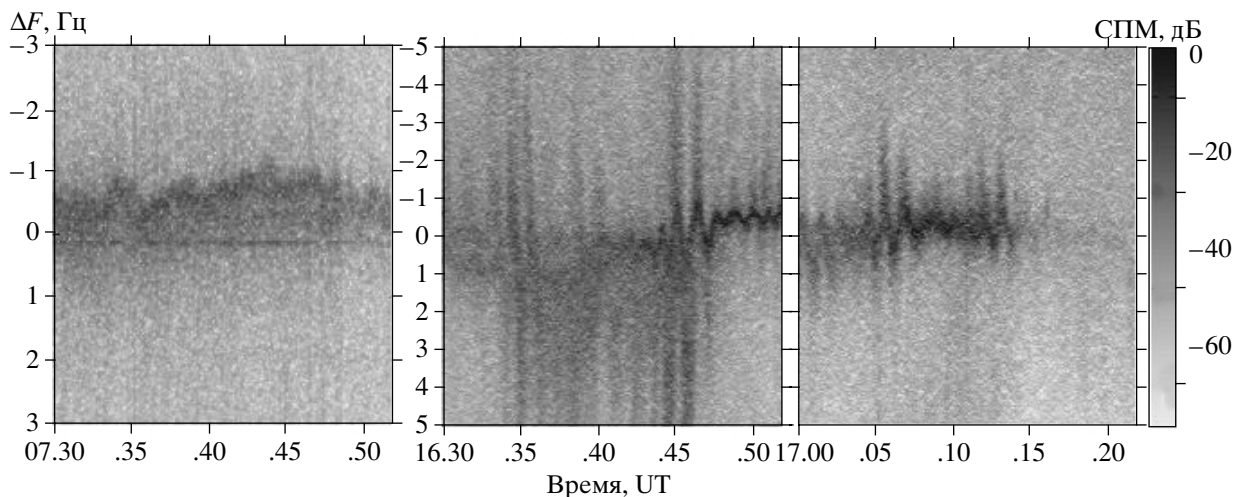


Рис. 4.

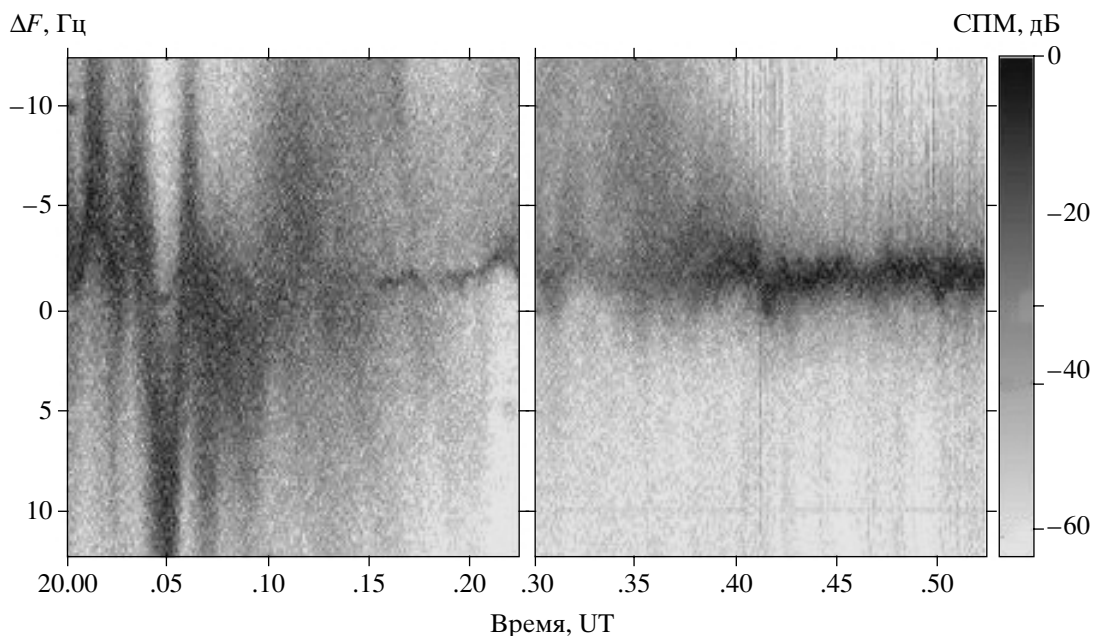


Рис. 5.

около трех минут отмечалось для данной трассы и в измерениях вечером 31.X., вплоть до 18.00 UT.

Для еще одной трассы – Кавала, Греция (40N58, 24E21, радиостанция “Радио Свобода”, 7220 кГц, длина трассы 2440 км) измерения проводились в период 20.00–23.00 UT, 00.00–02.00 UT. Ночью с 29 на 30.X. преобладал рассеянный сигнал, ширина спектра по уровню 10 дБ была в пределах от 5 до 10 Гц. Наиболее интенсивные волновые возмущения для данной трассы (рис. 5) наблюдались в период 20.00–20.15 UT 30.X. – колебания доплеровского сдвига с размахом до 20 Гц и основным периодом около двух минут.

При сопоставлении этих данных с данными для трассы Архангельск–Казань нужно учитывать более высокую рабочую частоту, а так же большую длину трассы. Так же в период 00.00–01.00, несмотря на преимущественно рассеянный характер сигнала, определяется наличие интенсивных вариаций с периодами 2.5–3 мин. В сеансе наблюдений после 20.00.31.X. наблюдается уже картина, практически неотличимая от того, что можно видеть в дни без геомагнитных возмущений.

Таким образом, на основе анализа данных наклонного зондирования ионосферы во время сильной магнитной бури 29–31.X. выявлены сле-

дующие особенности вариаций доплеровского сдвига частоты ионосферного сигнала:

1. В период геомагнитного возмущения 29–31.X.2003 г. на КВ-радиотрассах различной ориентации наблюдались интенсивные вариации доплеровского сдвига частоты, превосходящие на порядок, а кратковременно и на два порядка вариации соответствующие дням без магнитных возмущений.

2. Для вариаций доплеровского сдвига в эти дни характерно преобладание относительно малых периодов (1–3.5 мин), меньших частоты Брента–Вяйсяля (около 5 мин для высот ионосферы). Следовательно, такие вариации не могут быть связаны с прохождением ВГВ, а имеют другую природу.

3. Наблюдавшееся 29.X. волновое возмущение может иметь пространственные масштабы порядка нескольких сот км и очень большую фазовую скорость. Колебания, вызванные этим возмущением, имеют резкий фронт, похожий по виду на фронт ударной волны.

4. Для слабых геомагнитных возмущений отклик в форме искажений параметров КВ-радиосигнала наблюдается, как правило, только для

трасс, проходящих через высокоширотные районы, а в данном случае были затронуты все радиотрассы, в том числе и из г. Кавала (40N58).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 03-07-90288.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю., Шорников В.О. Многоканальный измерительный фазо-угломерный комплекс КВ-диапазона // Прием и обработка сигналов в сложных информационных системах. Вып. 21. Изд-во КГУ. С. 113–121.
2. Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю., Шорников В.О. Исследование ионосферы фазовым методом // Депонент ВИНТИ 18.01.02. № 87-В2002.
3. Бочкарев В.В., Петрова И.Р., Теплов В.Ю. Параметры волновых движений в нижней ионосфере по наблюдениям на доплеровском фазо-угломерном комплексе Казанского гос. Университета // Сборник докладов Байкальской школы по фундаментальной физике. Иркутск, 2003. С. 52–54.
4. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983.
5. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. С. 584.