УДК 550.388.2+533.951+537.868

СОГЛАСОВАННЫЕ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ УРОВНЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ И ДОПЛЕРОВСКОГО СМЕЩЕНИЯ ЧАСТОТЫ РАКУРСНО-РАССЕЯННЫХ ИСКУССТВЕННЫМИ ИОНОСФЕРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ РАДИОВОЛН ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Л. Ф. Черногор ¹, Г. Г. Вертоградов ², В. П. Урядов ³, Е. Г. Вертоградова ², М. А. Шамота ¹

 1 Харьковский национальный университет им. В. Н. Каразина, г. Харьков, Украина; 2 Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону;

³ Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты экспериментальных исследований согласованных квазипериодических вариаций уровня геомагнитных пульсаций и эффективного доплеровского смещения частоты ракурснорассеянного искусственными ионосферными неоднородностями радиоизлучения декаметрового диапазона длин волн. Для обработки сигналов использовались системный спектральный анализ и корреляционный анализ. Показано, что квазипериодические вариации эффективного доплеровского смещения частоты вызываются пульсациями геомагнитного поля с амплитудой 0,5÷1,0 нТл и периодом 50÷150 с. Оценённая амплитуда скорости квазипериодического и апериодического дрейфа ионосферных неоднородностей оказалась близкой к величинам 5÷10 и 15÷30 м/с соответственно.

ВВЕДЕНИЕ

Для исследования магнитосферно-ионосферного взаимодействия, а также магнито-ионосферных возмущений большой интерес представляет возможность воздействия на околоземную плазму мощным радиоизлучением [1]. Одним из основных эффектов такого воздействия является интенсивное мелкомасштабное расслоение ионосферной плазмы на ориентированные вдоль магнитного поля неоднородности концентрации электронов [1–3]. Эти неоднородности вызывают интенсивное ракурсное рассеяние радиоизлучения метрового и декаметрового диапазонов длин волн. Изучение статистических характеристик ракурсно-рассеянных радиоволн позволяет получать обширную информацию о физических процессах в ионосфере. В частности, доплеровские измерения дают важные сведения об особенностях поведения мелкомасштабных искусственных неоднородностей, о движении рассеивающих неоднородностей в магнитоактивной плазме и т. д. [4–10].

На движение плазменных неоднородностей в *F*-области ионосферы существенное влияние оказывает геомагнитное поле и его квазипериодические вариации (пульсации), причём роль последних изучена недостаточно. Целью настоящей работы является изложение результатов экспериментальных исследований согласованных квазипериодических вариаций уровня геомагнитных пульсаций и эффективного доплеровского смещения частоты ракурсно-рассеянного искусственными ионосферными неоднородностями радиоизлучения декаметрового диапазона длин волн.

Соответствующий эксперимент проведён 31 августа, 1 и 2 сентября 2009 года.

1. СОСТОЯНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Накануне, в период активного эксперимента и после него состояние космической погоды было следующим. В ночь с 29 на 30 августа 2009 года наблюдалось внезапное начало сильной магнитной

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.

бури. Её главная фаза имела место примерно с 07:00 UT 30 августа до 07:00 UT 31 августа 2009 года. При этом значения магнитных индексов составили $D_{\rm st\,min} \approx -32$ нTл, $K_{\rm p\,max} = 7$. Во время бури измеренная на спутнике компонента геомагнитного поля $H_{\rm p}$ увеличивалась до 90 нTл. Плотность потока электронов существенно изменялась лишь 1, 2 и 3 сентября, плотность потока протонов оставалась практически неизменной.

31 августа, 1 и 2 сентября 2009 года индекс $K_{\rm p}$ равнялся 1÷2, а величина $D_{\rm st} \approx -10 \div 5$ нТл. Поведение $H_{\rm p}(t)$ было типичным для невозмущённых или слабо возмущённых условий.

Таким образом, состояние космической погоды в период активного эксперимента благоприятствовало выявлению эффектов искусственного происхождения.

2. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ

2.1. Нагревный стенд «Сура»

Для нагрева ионосферы использовался стенд «Сура» с координатами 56°09' с. ш., 46°06' в. д. Воздействие на ионосферу осуществлялось в циклическом режиме (один цикл состоял из 20 мин нагрева и 10 мин паузы) немодулированной радиоволной обыкновенной поляризации на частоте $f_1 = 4,3$ МГц. Значение f_1 сначала было меньше, а затем больше критической частоты f_{0F_2} , которая в ходе эксперимента изменялась от 5,7 до 4,1 МГц. Два радиопередатчика работали синфазно, их суммарная мощность P составляла 0,35 МВт, коэффициент усиления антенны $G \approx 110$. В результате эффективная мощность системы PG была примерно равна 40 МВт.

Для усиления возмущения ионосферной плазмы за счёт эффекта магнитного зенита диаграмма направленности антенны была наклонена к югу на 12°.

2.2. Приёмно-обрабатывающий комплекс декаметрового диапазона длин волн

Для исследования временны́х вариаций характеристик ракурсно-рассеянного радиоизлучения декаметрового диапазона длин волн использовался комплекс аппаратуры, описанный в работе [11]. Приём ракурсно-рассеянных сигналов осуществлялся в г. Ростов-на-Дону. Радиопередающие устройства находились в городах Самара (частоты 12055 и 15510 кГц), Урумчи (Китай; 13650 и 13790 кГц) и Москва (14996; 15540 и 15605 кГц).

2.3. Магнитометр-флюксметр

Несерийный высокочувствительный магнитометр, включённый в состав программно-аппаратного комплекса, был размещён в обсерватории Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина (с. Граково, Харьковская обл., Украина) [12]. Его географические координаты 49°39′ с. ш., 36°56′ в. д., геомагнитные координаты +45°20′ широты и 119°20′ долготы.

Магнитометр-флюксметр измерял уровень флуктуаций *H*- и *D*-компонент геомагнитного поля. Последние отвечают осям север—юг и запад—восток. Чувствительность магнитометра составляла 0,5÷500 пТл в диапазоне периодов 1÷1000 с соответственно.

3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

3.1. Первичная обработка

При обработке ракурсно-рассеянных сигналов сначала вычислялись временные вариации эффективного доплеровского смещения частоты (далее для краткости — доплеровского смещения частоты). Последнее находилось интегрированием смещения частоты по всему спектру ракурснорассеянного сигнала с весом, равным относительной спектральной амплитуде соответствующей гармоники. Затем временные вариации доплеровского смещения частоты подвергались спектральному и корреляционному анализу.

Выходной сигнал магнитометра в каждом из двух каналов, соответствующих двум горизонтальным компонентам H и D геомагнитного поля, с учётом его калибровочной амплитудночастотной характеристики преобразовывался в уровень флуктуаций геомагнитного поля (измеряемый в нанотеслах) в диапазоне периодов $1\div1000$ с. Временные вариации уровня флуктуаций затем подвергались дальнейшей обработке и, в частности, фильтрации в заданных поддиапазонах периодов.

3.2. Системный спектральный анализ

Для спектрального анализа временны́х зависимостей доплеровского смещения частоты и уровня пульсаций геомагнитного поля применялся системный подход, изложенный в работах [13–15]. Предварительно из данных вычитался тренд, полученный методом скользящего среднего на интервале времени 5 мин. Спектральное оценивание проводилось для диапазона периодов 50÷150 с.

Для этого использовались оконное преобразование Фурье, адаптивное преобразование Фурье и вейвлет-преобразование, имеющие вид [14, 15]:

$$S_f(T,\tau) = \sqrt{\frac{2}{t_{\rm wS}}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g\left(\frac{t-\tau}{t_{\rm wS}/2}\right) \exp\left(-i\frac{2\pi t}{T}\right) \,\mathrm{d}t,$$
$$A_f(T_\nu,\tau) = \sqrt{\frac{2}{\nu_1 T_\nu}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g\left(\frac{t-\tau}{\nu_1 T_\nu/2}\right) \exp\left[-i\frac{2\pi}{T_\nu}\left(t-\tau\right)\right] \,\mathrm{d}t,$$
$$W_f(T_\nu,\tau) = \sqrt{\frac{2}{\nu_2 T_\nu}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\psi^*\left(\frac{t-\tau}{\nu_2 T_\nu/2}\right) \,\mathrm{d}t.$$

Здесь f(t) — исследуемый временной ряд, g(t) — вещественная оконная функция, обладающая свойством локализованности по времени, τ — параметр, описывающий смещение оконной функции относительно сигнала вдоль временной оси; $t_{\rm wS}$ — ширина окна для оконного преобразования Фурье, ν_1 и ν_2 — коэффициенты, равные числу периодов гармонической функции, укладывающихся на ширине оконной функции в адаптивном преобразовании Фурье и материнского вейвлета $\psi(t)$ соответственно, T и T_{ν} — величины, имеющие физический смысл текущих значений периода, индекс * обозначает комплексное сопряжение.

При оконном и адаптивном преобразованиях Фурье использовалось следующее окно:

$$g(t) = \gamma [0.54 + 0.46 \cos(\pi t)],$$

где $\gamma \approx 1.12$ — нормирующий множитель.

768

Для вейвлет-преобразования в качестве материнской функции $\psi(t)$ применялся вейвлет Морле, который задаётся известным выражением:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2)\cos(5t).$$

Кроме спектрограмм $P_{S_f}(T,\tau) = |S_f(T,\tau)|^2$, $P_{A_f}(T_{\nu},\tau) = |A_f(T_{\nu},\tau)|^2$ и $P_{W_f}(T_{\nu},\tau) = |W_f(T_{\nu},\tau)|^2$, нормированных на максимальное значение, анализировались энергограммы, т. е. распределения средней энергии квазипериодических процессов по периодам, имеющие вид

$$E_{S}(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{S_{f}}(T,\tau) \,\mathrm{d}\tau, \qquad E_{A}(T_{\nu}) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{A_{f}}(T_{\nu},\tau) \,\mathrm{d}\tau, \qquad E_{W}(T_{\nu}) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_{W_{f}}(T_{\nu},\tau) \,\mathrm{d}\tau$$

которые также нормировались на максимальное значение.

Результатом системного спектрального анализа является получение время-периодных зависимостей спектральной плотности мощности доплеровского смещения частоты и уровня геомагнитных пульсаций, а также энергограмм.

3.3. Корреляционный анализ

В настоящей работе исследовалась взаимная корреляция между доплеровским смещением частоты на разных радиотрасах (частотах), между уровнями пульсаций *H*- и *D*-компонент геомагнитного поля, а также между уровнем пульсаций и доплеровским смещением частоты, соответствующим разным радиотрассам.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

4.1. Временные вариации доплеровского смещения частоты

Примеры временны́х вариаций доплеровского смещения частоты $\delta f(t)$, измеренных 31 августа, 1 и 2 сентября 2009 года показаны на рис. 1. Практически в каждом сеансе после включения мощного стенда «Сура» возникали апериодические и квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты.

При апериодических вариациях доплеровское смещение частоты составляло 1÷2 Гц. Важно, что для радиопередающих устройств, расположенных западнее (вблизи Москвы) и восточнее (вблизи Самары и Урумчи), доплеровские смещения частоты были соответственно отрицательными и положительными. Время развития апериодических возмущений изменялось от 30 до 200 с.

Квазипериодические вариации имели период, как правило, равный 80÷100 с. Продолжительность этих вариаций изменялась от 3 до 20 мин. Их амплитуда равнялась 0,1÷1 Гц. Обращает на себя внимание то, что колебания доплеровского смещения частоты для радиопередающих устройств, расположенных западнее и восточнее нагревного стенда, находились практически в противофазе.

4.2. Временные вариации уровня геомагнитных пульсаций

29–31 августа 2009 года происходила сильная магнитная буря. В результате действия бури 30 августа амплитуда геомагнитных пульсаций в отдельные интервалы времени достигала 6 нТл, а 31 августа она не превышала 3 нТл. В последующие дни амплитуда изменялась в пределах 1,5÷2,5 нТл. Лишь 4 сентября имело место увеличение амплитуды пульсаций до 4 нТл. Наи-



Рис. 1. Временны́е вариации доплеровского смещения частоты для различных радиотрасс и частот: (a) - 31 августа 2009 года, (b) - 1 сентября 2009 года, (b) - 2 сентября 2009 года. Здесь и далее прямыми вертикальными линиями показаны моменты начала и окончания работы нагревного стенда

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Рис. 1 (продолжение)

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Рис. 2. Временны́е вариации уровня геомагнитных пульсаций 30 августа–4 сентября 2009 года (панели сверху вниз)

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.

большая амплитуда была у колебаний с периодом $T \approx 5 \div 15$ мин. При величине $T \approx 50 \div 150$ с она была на порядок меньше.

Примеры временны́х вариаций уровня геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов 1÷ ÷1000 с в дни работы стенда «Сура» и в контрольные дни приведены на рис. 2. Из него видно, что во флуктуациях уровня геомагнитного поля как в фоновые дни, так и в дни активного эксперимента эпизодически возникали достаточно упорядоченные цуги колебаний длительностью от 2÷4 до 10 мин. Выделялись колебания с периодами $T \approx 60$ ÷100 с. Их амплитуда достигала 0,5÷1 нТл.

Вероятность возникновения пульсаций в различные дни существенно отличалась. Так, например, в интервале времени 13:20–13:40 UT 2 сентября 2010 года пульсации практически отсутствовали.

Связь уровня пульсаций с работой нагревного стенда не просматривается (см. рис. 2).

Временны́е зависимости H(t) и D(t) в диапазоне периодов 50÷150 с, вообще говоря, не повторяли друг друга. Напротив, нередко они изменялись почти в противофазе.

4.3. Согласованные временные вариации уровня геомагнитных пульсаций и доплеровского смещения частоты

Пример согласованных вариаций H(t), D(t) и $\delta f(t)$ в диапазоне периодов 50÷150 с приведён на рис. 3. Из него видно, что вариации доплеровского смещения частоты в целом отслеживали вариации уровня геомагнитных пульсаций. Амплитуде пульсаций в 1÷2 нТл соответствовала амплитуда доплеровского смещения частоты 0,5÷1 Гц.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

5.1. Спектр вариаций доплеровского смещения частоты

Пример результатов спектрального анализа временны́х зависимостей доплеровского смещения частоты в диапазоне периодов 50÷150 с для частоты 13790 кГц (Урумчи, Китай) показан на рис. 4. Из него видно, что для трассы Урумчи—«Сура»— Ростов-на-Дону в определённые интервалы времени в спектре преобладали периоды 75÷90 и 120÷140 с.

Для двух трасс Москва—«Сура»—Ростов-на-Дону (частоты 14996 и 15605 кГц) основным было колебание с периодом 100÷110 с. Для трассы Самара—«Сура»—Ростов-на-Дону (частота 15510 кГц) основная энергия содержалась в колебании с периодом $T \approx 110$ ÷130 с. Несколько меньшую амплитуду имело колебание с периодом $T \approx 70$ ÷90 с. На всех радиотрассах амплитуда колебаний доплеровского смещения частоты составляла 0,2÷0,8 Гц.

Таким образом, в рассматриваемом интервале времени на всех радиотрассах возникала модуляция доплеровского смещения частоты с периодом 90÷120 с.

5.2. Спектр вариаций уровня геомагнитных пульсаций

Примеры результатов спектрального анализа временны́х вариаций уровня геомагнитных пульсаций в диапазоне периодов 50÷150 с приведены на рис. 5.

В контрольный день были чётко выражены колебания с периодами 80÷100 и 120÷140 с для *H*-компоненты и 60÷80 и 110÷130 с для *D*-компоненты (см. рис. 5*a*). Их амплитуда не превышала 0,3÷0,4 нТл.

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Рис. 3. Временны́е вариации уровня геомагнитных пульсаций и доплеровского смещения частоты 1 сентября 2009 года на различных радиотрассах и частотах в диапазоне периодов 50÷150 с

31 августа 2009 года в спектре вариаций уровня геомагнитных пульсаций преобладала составляющая с периодом $T \approx 70 \div 120$ с и амплитудами до 1 и 0,5 нТл для *H*- и *D*-компонент соответственно. Длительность цугов составляла 4 и 6 мин (см. рис. 56).

1 сентября 2009 года наблюдались цуги колебаний с периодами $T\approx 80\div110$ с и длительностью 3÷5 мин. Их амплитуды не превышали 2 и 0,4 нТл для H- и D-компонент соответственно.

2 сентября 2009 года отмечались квазипериодические колебания с периодами $T \approx 80 \div 120$ с, амплитудами 0,5 и 0,2 нТл для H- и D-компонент соответственно и длительностью $4 \div 8$ мин.

В контрольный день 3 сентября 2009 года основная энергия была сосредоточена в колебании с периодом $T \approx 110 \div 130$ с для H-компоненты и $T \approx 100 \div 150$ с для D-компоненты. Их амплитуды достигали соответственно 0,5 и 0,25 нТл. Менее выражено было колебание с периодом $T \approx 60 \div 80$ с.

5.3. Взаимная корреляция между временными вариациями доплеровского смещения частоты

Значительный интерес представляет изучение корреляции между квазипериодическими вариациями доплеровского смещения частоты на различных радиотрассах. Пример временны́х зависимостей коэффициентов взаимной корреляции ρ приведён на рис. 6. Из него видно, что между



Рис. 4. Результаты спектрального анализа временны́х вариаций доплеровского смещения частоты (после удаления тренда методом скользящего среднего на интервале времени 5 мин) 1 сентября 2009 года в диапазоне периодов $50\div150$ с, $f = 13\,790$ кГц. Панели сверху вниз: анализируемая зависимость, результаты оконного преобразования Фурье, адаптивного преобразования Фурье и вейвлет-преобразования. Справа приведены энергограммы в относительных единицах для соответствующих преобразований

близкими трассами Урумчи—«Сура»—Ростов-на-Дону (частоты 13650 и 13790 кГц) величина ρ достигала значений 0,75÷0,85 при временно́м сдвиге $\tau \approx 0.$

В то же время между близкими трассами Самара—«Сура»—Ростов-на-Дону (частоты 12055 и 15510 кГц) и близкими трассами Москва—«Сура»—Ростов-на-Дону (частоты 14996 и 15605 кГц) величина $\rho_{\rm max}$ составляла 0,60÷0,66 и 0,50÷0,63 соответственно. Максимальные значения ρ имели место при $\tau \approx 0.$

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Рис. 5. Результаты спектрального анализа временны́х вариаций уровня геомагнитных пульсаций (после удаления тренда методом скользящего среднего на интервале времени 5 мин) в диапазоне периодов 50÷150 с: (*a*) — 29 августа, (*б*) — 31 августа 2009 года

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.



Рис. 6. Временны́е зависимости доплеровского смещения частоты на радиотрассах Урумчи— «Сура»—Ростов-на-Дону (частоты 13 650 и 13 790 кГц), (*a*), и коэффициента взаимной корреляции между ними, (*б*), 2 сентября 2009 года

Значения $\rho \approx 0,40\div 0,45$ при $\tau \approx 0$ отмечались между различно ориентированными трассами Самара—«Сура»—Ростов-на-Дону (частота 15510 кГц) и Москва—«Сура»—Ростов-на-Дону (частота 15605 кГц). Значения $\rho_{\rm max} \approx 0,60\div 0,70$ достигались при $\tau \approx 10$ мин. В других циклах нагрева максимальное значение коэффициента взаимной корреляции отмечалось, скорее, не при $\tau \approx 0$, а при сдвиге, равном 7÷10 мин.

5.4. Взаимная корреляция между временны́ми вариациями уровня пульсаций *H*- и *D*-компонент геомагнитного поля

Пример результатов расчёта временно́й зависимости коэффициента взаимной корреляции $\rho_{HD}(\tau)$ между уровнями флуктуаций *H*- и *D*-компонент геомагнитного поля 31 августа 2009 года приведён на рис. 7. В этот день коэффициента р_{HD} достигал наибольших значений 0,6÷0,7. Наименьших значений он достигал 1 сентября 2009 года. Они примерно равнялись 0,4 при $\tau \approx 0$. Кроме того, максимальные значения ρ_{HD} в интервале времени ±10 мин наблюдались дважды и даже трижды. Скорее всего, так проявлялся квазипериодический процесс в ионосфере с периодом $T \approx 400$ с ≈ 7 мин.



Рис. 7. Временна́я зависимость коэффициента взаимной корреляции между уровнями *H*- и *D*-компонент геомагнитного поля в интервале времени 13:20–13:40 UT 31 августа 2009 года

5.5. Взаимная корреляция между временными вариациями уровня геомагнитных пульсаций и доплеровского смещения частоты

Примеры временны́х зависимостей коэффициентов взаимной корреляции между уровнем геомагнитных пульсаций (отдельно для *H*- и *D*-компонент) и доплеровским смещением частоты приведены на рис. 8. Из него видно, что коэффициенты $\rho_{Hf}(\tau)$ и $\rho_{Df}(\tau)$ изменяются по квазипериодическому закону с периодом, примерно равным 100 с. Максимальные значения ρ_{Hf} и ρ_{Df} в этом цикле наблюдений имели место при сдвиге временно́й зависимости доплеровского смещения частоты по отношению к вариациям H(t) и D(t) на $\tau \approx +200$ с. Заметное увеличение корреляции наступало при сдвиге 50÷70 с. Максимальное значение коэффициентов корреляции составляло примерно 0,6. Интервал корреляции на уровне 0,5 был близок к 110÷190 с.



Рис. 8. Временны́е зависимости коэффициентов взаимной корреляции между уровнем H- и D-компонент геомагнитного поля и доплеровским смещением частоты с 13:20 до 13:40 UT 1 сентября 2009 года для ряда радиотрасс: (a) — $f = 13\,790$ кГц; (b) — $f = 14\,996$ кГц; (b) — $f = 15\,510$ кГц; (c) — $f = 15\,605$ кГц

В других циклах измерений в интервале $\tau \approx \pm 10$ мин наблюдались два максимума в зависимостях $\rho_{Hf}(\tau)$ и $\rho_{Df}(\tau)$. Временной интервал между ними был около 400 с ≈ 7 мин.

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.

6. ОБСУЖДЕНИЕ

6.1. Механизм согласованных вариаций

Приведённые экспериментальные результаты свидетельствует о том, что практически во всех циклах нагрева ионосферной плазмы мощным радиоизлучением стенда «Сура» наблюдались достаточно упорядоченные и согласованные колебания, как уровня геомагнитных пульсаций, так и доплеровского смещения частоты радиоволн, ракурсно-рассеянных искусственными неоднородностями ионосферы.

Значения периодов изменялись в широких пределах: примерно от 70 до 140 с. Колебания с периодом $T \approx 70$ с наблюдались систематически.

Знак доплеровского смещения частоты зависел от ориентации радиотрассы по отношению к месту расположения нагревного стенда: для западных радиотрасс доплеровское смещение частоты было отрицательным, для восточных — положительным. Знак определялся не столько географическим расположением радиопередающих устройств, сколько их расположением по отношению к магнитному меридиану, проходящему через рассеивающую область. Каков же механизм наблюдаемого доплеровского смещения частоты?

Не вызывает сомнения, что апериодические вариации доплеровского смещения частоты вызваны движением рассеивающих неоднородностей в магнитоактивной плазме. Периодические вариации доплеровского смещения частоты обусловлены периодическими вариациями скорости дрейфа плазменных неоднородностей в скрещенных $\delta \mathbf{E}$ и \mathbf{B}_0 полях (здесь $\delta \mathbf{E}$ — электрическое поле альвеновской волны, проявлением которой являются геомагнитные пульсации, \mathbf{B}_0 — индукция главного магнитного поля Земли). Возникает вопрос: что представляют собой геомагнитные пульсации? Иными словами, есть ли они результат воздействия мощного радиоизлучения, или они имеют естественное происхождение?

Анализ показал, что нет чёткой и однозначной реакции пульсаций на включение мощного радиоизлучения. Возможно, что эта реакция может быть обнаружена статистическими методами при наличии достаточно большого объёма однородных данных. Поэтому далее будем считать, что согласованные с квазипериодическими вариациями доплеровского смещения частоты геомагнитные пульсации имеют естественное происхождение.

Известно, что пульсации с периодом $T \approx 45 \div 150$ с относятся к пульсациям Рс4 [16, 17]. Их существование связано с гармониками (модами) альвеновских колебаний в магнитосфере. Для геомагнитной оболочки над стендом «Сура» параметр Мак-Илвейна $L \approx 2,4$. Длина магнитной силовой трубки $l \approx 33$ тыс. км. Тогда период собственных колебаний магнитной силовой линии

$$T_{\rm A} = \int_{0}^{2l} \frac{dl}{v_{\rm A}}$$

где $v_{\rm A}$ — альвеновская скорость. Полагая (см. ниже), что $v_{\rm A} \approx 800 \div 1500$ км/с, получим $T_{\rm A} \approx 45 \div 85$ с. Такое значение $T_{\rm A}$ примерно соответствует периоду модуляции доплеровского смещения частоты.

Важно отметить, что горизонтальный масштаб геомагнитных пульсаций Pc4 близок к 1000 км [16, 17]. Поэтому колебания геомагнитного поля над Васильсурском (стенд «Сура») и Харьковом были практически синфазными. Наблюдаемое запаздывание (около 200 с) квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты по отношению к геомагнитным пульсациям, скорее всего, связано с временем установления квазипериодических движений рассеивающих неоднородностей.

6.2. Теоретические оценки

Опишем кратко механизм модуляции доплеровского смещения частоты геомагнитными пульсациями. При амплитуде скорости $v_{\rm a}$ квазипериодического движения ионосферных неоднородностей амплитуда доплеровского смещения частоты составляет

$$\delta f_{\rm a} = \mathbf{q} \mathbf{v}_{\rm a} / (2\pi). \tag{1}$$

Здесь q — разность волновых векторов падающего и рассеянного излучений.

Распространение альвеновской волны, которая является поперечной как в электродинамическом, так и в гидродинамическом смысле, приводит к модуляции скорости направленного движения рассеивающих неоднородностей в перпендикулярном к главному магнитному полю Земли направлении.

Как известно, альвеновская скорость даётся следующим соотношением [16]:

$$v_{\rm A} = B_0 / \sqrt{\mu_0 \rho_{\rm i}} \,,$$

где B_0 — индукция главного магнитного поля Земли, μ_0 — магнитная постоянная, $\rho_i = Nm_i$ — плотность плазмы, N — концентрация ионов (электронов), m_i — масса иона.

Вблизи максимума ионизации плазмы F-слоя масса основного иона (иона атомарного кислорода) составляет 2,7 · 10⁻²⁶ кг, в обсуждаемых экспериментах $N \approx (2 \div 4, 4) \cdot 10^{11}$ м⁻³. Тогда в максимуме ионизации плазмы F-слоя скорость $v_{\rm A} = 410 \div 610$ км/с. В вершине магнитной силовой трубки с $L \approx 2,4$, где $m_{\rm i} \approx 1,7 \cdot 10^{-27}$ кг, $N \approx (0,2 \div 1) \cdot 10^{10}$ м⁻³, $v_{\rm A} = 1300 \div 2700$ км/с. В среднем вдоль магнитной силовой трубки $v_{\rm A} = 800 \div 1500$ км/с.

Для поперечной альвеновской волны амплитуда скорости дрейфа ионосферных неоднородностей в скрещенных $\delta \mathbf{E}$ и \mathbf{B}_0 полях $v_{\rm a} = \delta E_{\rm a}/B_0$. Поскольку амплитуда электрического поля $\delta E_{\rm a} = v_{\rm A} \, \delta B_{\rm a}$, где $\delta B_{\rm a}$ — амплитуда возмущений индукции магнитного поля,

$$v_{\rm a} = v_{\rm A} \, \frac{\delta B_{\rm a}}{B_0} = \frac{\delta B_{\rm a}}{\sqrt{\mu_0 \rho_{\rm i}}}$$

Оценим v_a при $\delta B_a = 0,5 \div 1$ н Тл и $v_A = 410 \div 610$ км/с. При этом $v_a \approx 4 \div 12$ м/с. Как следует из (1), при $q = 2k \sin(\theta/2)$

$$\delta f_{\rm a} = \frac{kv_{\rm a}}{\pi} \sin(\theta/2) \cos \alpha = \frac{2v_{\rm a}}{\lambda} \sin(\theta/2) \cos \alpha, \tag{2}$$

где θ — угол между волновыми векторами падающего и рассеивающего излучений (угол рассеяния), α — угол между векторами **q** и **v**_a, λ — длина рассеянной радиоволны, $k = 2\pi/\lambda$.

Угол α можно определить следующим образом. Поскольку квазипериодические колебания доплеровского смещения частоты для радиотрасс восточного и западного направлений были практически противофазными, то мы полагаем, что они были вызваны пульсациями величины скорости дрейфа неоднородностей вдоль направления регулярного дрейфа. Величину и направление скорости регулярного дрейфа неоднородностей в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, можно определить по данным одновременных измерений доплеровского смещения частоты ракурсно-рассеянных радиосигналов для различных станций [18].

По нашим оценкам, например, для радиотрассы Москва—«Сура»—Ростов-на-Дону для времени 13:20÷13:40 UT 01.09.2009 (см. рис. 16) $\theta \approx 118^{\circ}$, $\alpha \approx 127,5^{\circ}$. Тогда из (2) при $f \approx 15$ МГц, $\lambda \approx 20$ м, $v_{\rm a} \approx 4 \div 12$ м/с получим $\delta f_{\rm a} \approx -(0,2 \div 0,6)$ Гц. Примерно такие же значения амплитуды доплеровского смещения частоты наблюдались в экспериментах (см. рис. 1, 6).

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.

Добавим, что согласованные вариации доплеровского смещения частоты и уровня геомагнитных пульсаций также описаны в работах [19–22] применительно к вертикальным радиотрассам, а в работах [23–25] исследовались, как и в нашем случае, квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты ракурсно-рассеянных радиоволн. В работах [26–28] изучено взаимодействие искусственных ионосферных неоднородностей с альвеновскими волнами, а также процессы релаксации и диссипации этих неоднородностей. Наши результаты соответствуют результатам этих работ, существенно дополняя их.

Как показывают оценки, апериодическим вариациям доплеровского смещения частоты в 1÷2 Гц соответствовала скорость движения рассеивающих неоднородностей 15÷30 м/с.

выводы

1) В одновременных измерениях параметров ракурсно-рассеянных радиоволн и геомагнитных пульсаций обнаружены апериодические и согласованные квазипериодические вариации геомагнитного поля и доплеровского смещения частоты на радиотрассах различной ориентации по отношению к направлению магнитного поля Земли. Западной и восточной ориентации радиотрасс соответствовали отрицательные и положительные доплеровские смещения частоты, достигающие по модулю 1÷2 Гц. Квазипериодические колебания доплеровского смещения частоты для таких радиотрасс были практически противофазными.

2) Квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты имели периоды 70÷140 с, амплитуды 0,1÷1 Гц и длительности 3÷20 мин.

3) Геомагнитные пульсации в пределах циклов нагрева имели следующие параметры: периоды 60÷140 с, амплитуды 0,5÷1 нТл (редко до 2 нТл), длительности 3÷5 мин.

4) Коэффициент взаимной корреляции между квазипериодическими вариациями доплеровского смещения частоты на близких частотах для практически совпадающих радиотрасс достигал 0,75÷0,85, но обычно не превышал 0,50÷0,66. Для сильно отличающихся радиотрасс он уменьшался до 0,40÷0,45. В первом случае максимальное значение коэффициента взаимной корреляции имело место при нулевом временном сдвиге, а во втором случае — при значительных сдвигах, равных нескольким минутам.

5) Коэффициент взаимной корреляции между квазипериодическими вариациями уровней *H*и *D*-компонент геомагнитного поля достигал 0,4÷0,7. Максимальное значение коэффициента корреляции не всегда соответствовало нулевому временному сдвигу.

6) Апериодические вариации доплеровского смещения частоты вызывались движением рассеивающих радиово́лны ионосферных неоднородностей со скоростью порядка 15÷30 м/с.

7) Квазипериодические вариации доплеровского смещения частоты были обусловлены модуляцией скорости движения ионосферных неоднородностей альвеновской волной с периодами 70÷140 с за счёт дрейфа плазмы в скрещенных полях (электрическое поле альвеновской волны и геомагнитное поле). Амплитуде альвеновской волны, равной 0,5÷1 нТл, соответствовала амплитуда квазипериодических вариаций скорости движения ионосферных неоднородностей, примерно равная 5÷10 м/с.

8) Теоретически оценённые значения амплитуды квазипериодических вариаций доплеровского смещения частоты и их наблюдаемые значения находятся в хорошем согласии.

9) Коэффициент взаимной корреляции между временны́ми зависимостями доплеровского смещения частоты и уровнем геомагнитных пульсаций достигал 0,6, несмотря на то, что магнитные измерения проводились на расстоянии около 1000 км от рассеивающей области ионосферы.

Авторы выражают благодарность Г.П. Комракову за обеспечение работы стенда «Сура», К.П. Гармашу и С.Г. Леусу за измерения на магнитометре-флюксметре, С.В. Панасенко за помощь, оказанную при работе над рукописью статьи.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 09-02-00109).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Гуревич А.В. // УФН. 2007. Т. 177, № 11. С. 1 145.
- 2. Fialer P. A. // Radio Sci. 1974. V. 9, No. 11. P. 923.
- Гетманцев Г. Г., Ерухимов Л. М., Митяков Н. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 1976. Т. 19, № 12. С. 1909.
- 4. Колосков А. В., Белей В. С., Лейзер Т. Б., Ямпольский Ю. М. // Радиофизика и радиоастрономия. 1999. Т. 4, № 3. С. 247.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 9. С. 722.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Вертоградов В. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 669.
- 7. Зализовский А.В., Галушко В.Г., Кащеев А.С. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 5. С. 674.
- Благовещенская Н. Ф., Борисова Т. Д., Корниенко В. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2007. Т. 50, № 8. С. 678.
- Урядов В. П., Вертоградов Г. Г., Понятов А. А. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 12. С. 1011.
- Борисова Т. Д., Благовещенская Н. Ф., Корниенко В. А. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 4. С. 535.
- 11. Вертоградов Г. Г., Мятежников Ю. П., Урядов В. П., Розанов С. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т. 47, № 1. С. 15.
- Гармаш К. П., Леус С. Г., Пазюра С. А. и др. // Радиофизика и радиоастрономия. 2003. Т. 8, № 2. С. 163.
- 13. Лазоренко О. В., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2006. Т. 10, № 10. С. 39.
- 14. Бурмака В. П., Панасенко С. В., Черногор Л. Ф. // Успехи современной радиоэлектроники. 2007. № 11. С. 3.
- 15. Черногор Л. Ф. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 5. С. 681.
- 16. Нишида А. Геомагнитный диагноз магнитосферы. М.: Мир, 1980.
- 17. Паркинсон У. Введение в геомагнетизм. М.: Мир, 1986.
- Kim V. Yu., Gorochov Yu. V., Ivanov V. P., et al. // VI Int. Suzdal URSI Symposium, Moscow, October 19–21, 2004. P. 42.
- 19. Klostermeyer J., Rottger J. // Planet. Space Sci. 1976. V. 4. P. 1065.
- 20. Watermann J. // J. Geophys. 1987. V. 61, No. 1. P. 59.
- Альперович Л. С., Волгин А. В., Карпов П. Б. и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 6. С. 1003.
- Al'perovich L. S., Fedorov E. N., Volgin A. V., et al. // J. Atmos. Terr. Phys. 1991. V. 53, No. 6–7. P. 581.
- Благовещенская Н. Ф., Бубнов В. А., Шелухин В. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1992. Т. 35, № 1. С. 24.

Л. Ф. Черногор, Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов и др.

- 24. Беленов А. Ф., Пономаренко П. В., Синицын В. Г., Ямпольский Ю. М. // Изв. вузов. Радиофизика. 1993. Т. 36, № 12. С. 1089.
- 25. Belenov A. F., Erukhimov L. M., Ponomarenko P. V., Yampolski Yu. M. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 59, No. 18. P. 2367.
- Sinitsin V. G., Kelly M. C., Yampolski Yu. M., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. V. 61, No. 11. P. 903.
- Ponomarenko P. V., Zalizovski A. V., Yampolski Yu. M., Hysell D. L. // J. Geophys. Res. A. 2000. V. 105, No. 1. P. 171.
- 28. Hysell D. L., Kelly M. C., Yampolski Yu. M., et al. // J. Geophys. Res. 1996. V. 101, No. 12. P. 1654.

Поступила в редакцию 21 декабря 2010 г.; принята в печать 20 января 2011 г.

CONSISTENT QUASI-PERIODIC VARIATIONS OF THE GEOMAGNETIC PULSATION LEVEL AND DOPPLER FREQUENCY SHIFT OF DECAMETRIC RADIO WAVES ASPECT-SCATTERED BY ARTIFICIAL FIELD-ALIGNED IONOSPHERIC IRREGULARITIES

L. F. Chernogor, G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, E. G. Vertogradova, and M. A. Shamota

We present the results of experimental studies of consistent quasi-periodic variations of the geomagneticpulsation level and effective Doppler frequency shift of decametric radio waves aspect-scattered by artificial field-aligned ionospheric irregularities. For processing of signals, we used a system spectral analysis and a correlation analysis. It is shown that quasi-periodic variations of the effective Doppler frequency shift are caused by geomagnetic-field pulsations with an amplitude of 0.5–1.0 nT and a period of 50–150 s. Estimated amplitudes of the quasi-periodic and aperiodic drift velocities of the ionospheric irregularities appeared close to 5–10 and 15–30 m/s, respectively.