



И. В. Карпов, И. И. Шагимуратов

ИОНОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВОЛН ПУАНКАРЕ

Рассмотрены возможности физической интерпретации глобальных возмущений ионосферы в периоды повышенной геомагнитной активности. Особенности ионосферных возмущений в таких геофизических условиях состоят в том, что формируются глобальные возмущения, амплитуда которых возрастает к средним и низким широтам, фаза слабо зависит от широты, периоды составляют 4–6 час. Предлагается физическая интерпретация этого явления, основанная на предположении о возбуждении в атмосфере планетарных волн Пуанкаре. Оценки пространственно-временной структуры этих волн и их влиянию на ионосферу позволяют дать качественное объяснение наблюдаемой динамике ионосферы.

The article focuses on the possibilities of physical interpretation of global ionosphere agitations in the period of elevated geomagnetic activity. The authors offer a physical interpretation of this phenomenon based on the assumption about the agitation of planetary Poincare waves in atmosphere. The analysis of the space-time structure of these waves gives a credible explanation of the ionospheric dynamics under observation.

Ключевые слова: волны Пуанкаре, ионосфера, планетарные волны.

Keywords: Poincare waves, ionosphere, planetary waves.

Введение

В настоящее время широкое распространение получили исследования структуры и динамики ионосферы, основанные на приеме сигналов спутников Глонас/GPS. Технология приема и обработки таких сигналов позволяет получить информацию о полном электронном содержании в ионосфере — ТЕС (Total Electron Content). Такие наблюдения дают возможность получить данные о планетарном состоянии ионосферы с приемлемым для динамического анализа временным разрешением. Наблюдения ТЕС в периоды геомагнитных бурь выявили особенности релаксации ионосферы к невозмущенному состоянию, проявившиеся в возбуждении глобальных вариаций, амплитуда которых возрастает к средним и низким широтам, периоды вариаций составляют 4–6 ч, а их фаза слабо зависит от широты. Пример такого поведения суточных вариаций ТЕС в европейском секторе представлен на рисунке 1.

Как видно из рисунка, наибольшие возмущения в ионосфере возникли в период геомагнитной бури. На спаде геомагнитной активности в суточном ходе ТЕС появились возмущения с характерным периодом ~ 6 ч, локальные максимумы в суточных вариациях наблюдаются в одно и то же время в полосе средних широт. Необычная реакция ионосферы наблюдается через четыре дня после бури, когда при незначительном возрастании



геомагнитной активности отмечаются сильные возмущения ТЕС. Такие проявления ионосферных возмущений не связаны с внутренними гравитационными волнами, возбуждаемыми в высоких широтах, и распространяющимися к экватору. На динамику атмосферных возмущений с характерными периодами ~ 6 ч важное влияние оказывает вращение Земли, и, следовательно, атмосферные волны таких масштабов должны быть трехмерные. Для интерпретации возмущений ТЕС необходимо найти соответствующие атмосферные волны, влияние которых на ионосферу позволило бы получить качественное согласие с наблюдениями.

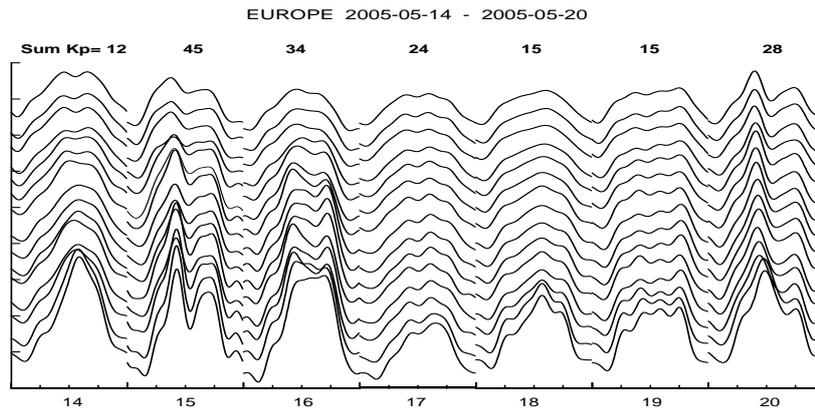


Рис. 1. Суточные вариации ТЕС в полосе широт 30–65 в европейском секторе в период геомагнитной бури 15.05.2005

Волны Пуанкаре

В геофизической гидродинамике известен класс волновых решений задачи о поверхностных волнах во вращающемся канале ограниченной ширины [1]. Высокочастотная ветвь таких волн ($\sigma > f = 2 \cdot \Omega \cdot \cos(\theta)$, σ — частота волны, Ω — угловая скорость вращения Земли, θ — коширота) является волнами Пуанкаре. Некоторые свойства этих волн в атмосфере Земли описаны в работе [2]. В общем виде пространственно-временная структура волн Пуанкаре описывается следующими формулами:

$$F(x, y, t) = F_0 \cdot \exp(-\beta \cdot y / 2) \cdot \sin(l_n \cdot y) \cdot \exp(i \cdot (k \cdot x - \sigma_n \cdot t)) \quad (1)$$

В формуле (1) x, y — продольная и поперечная по отношению к оси канала координаты, k — волновое число, $\beta = \frac{\sin(\theta)}{R}$ — параметр кривизны, $l_n = n \cdot \pi / L$ — волновое число в поперечном направлении к оси канала, L — ширина канала, n — целое, c — скорость звука. Дисперсионное соотношение для волн Пуанкаре имеет вид

$$\sigma_n = \pm c \cdot ((f/c)^2 + k^2 + l_n^2 + \beta^2/4)^{1/2} \quad \sigma_n / f > 1. \quad (2)$$

Важное место в установлении оправданности предположения о распространении волн Пуанкаре в атмосфере связано с определением положения канала. Экспериментальные данные по ТЕС показывают, что в полярных широтах (более 60°) послебуревые эффекты в ионосфере незначи-



тельно, по сравнению с возмущениями на средних широтах (рис. 1). Можно предположить, что северная стенка канала определяется резким возрастанием к полюсам фоновых параметров термосферы (температуры, давления) в период геомагнитного возмущения. Южная стенка канала определяется увеличением соответствующих термосферных параметров по мере приближения к экватору. В таком канале распространения фазовая скорость волн Пуанкаре будет направлена вдоль географической долготы. Длительность существования канала будет зависеть от времени релаксации к невозмущенному состоянию фоновых (среднесуточных) атмосферных параметров. Начальное возмущение состояния термосферы на средних широтах будет определяться возмущениями, которые создают ВГВ, распространяющиеся из полярной шапки в период развития геомагнитного возмущения. Из (1) и (2) следует, что волны Пуанкаре одинаковой частоты могут распространяться в противоположных направлениях. В предлагаемой интерпретации явления атмосферный канал кольцевой и в возмущенной ситуации волны Пуанкаре будут распространяться на восток и на запад вдоль оси канала. Это означает, что результирующая волновая картина в атмосфере будет определяться стоячей волной, образованной периодическими по долготе волнами. Условие периодичности волны Пуанкаре по долготе на заданной широте ($k \cdot \lambda = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \sin \theta$) определит периоды волн и их структуру в зависимости от широты.

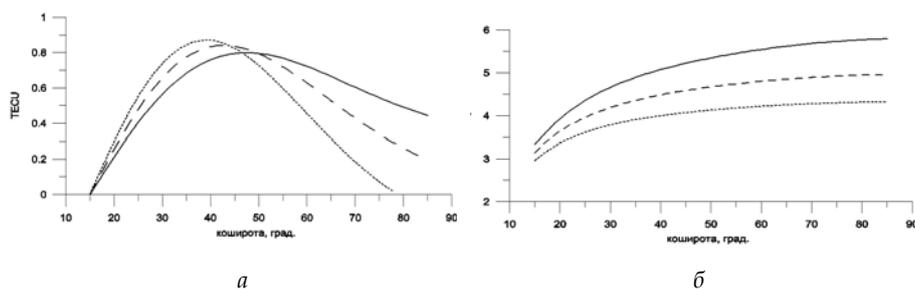


Рис. 2. Широтная структура (а) и периоды (б) стоячих волн Пуанкаре с зональным волновым числом $k=1$, для различной ширины канала; $L=9000$ км, $L_2=8000$ км, $L_3=7000$ км

На рисунке 2 показаны характеристики стоячих волн Пуанкаре при различной ширине атмосферного канала. Северная стенка канала задана на широте 15° . Как видно, на средних широтах периоды стоячих волн незначительно изменяются с широтой. Следовательно, фаза ионосферных возмущений от таких волн будет слабо зависеть от широты, а амплитуды возрастать в средних широтах, как это следует из наблюдений (рис. 1).

Ионосферные эффекты волн Пуанкаре

Термосферное возмущение, определяемое стоячей волной Пуанкаре, будет инициировать ионосферные эффекты. Задачи о влиянии термосферных возмущений на вертикальную структуру электронной концентрации в F-области ионосферы решались ранее, например [3].



В общем случае, зависимость электронной концентрации на высоте z от возмущения термосферного ветра представима в виде:

$$n(z, t) = n_0(z) \cdot \exp\left(-\int_{z_0}^z U / 2D \cdot dz\right) \quad (3)$$

В формуле (3) $n_0(z)$ – невозмущенное распределение электронной концентрации, U – возмущение вертикальной компоненты ионосферного дрейфа, вызванные термосферным возмущением, D – коэффициент амбиполярной диффузии. Оценку изменений ТЕС можно выполнить, полагая, что на высотах F-области вертикальная структура термосферного ветра не зависит от высоты в силу диссипации. Интегрирование (3) по высоте определит зависящее от времени значение ТЕС (4)

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-U \cdot H / D) \quad (4)$$

В (4) N_0 – невозмущенное значение ТЕС. Особенности ионосферной реакции на волну Пуанкаре будут состоять в следующем: 1) фаза ионосферных возмущений будет слабо зависеть от широты (рис. 2), 2) ночные эффекты будут значительно слабее дневных возмущений в силу малости ночных значений невозмущенного ТЕС в сравнении с дневными значениями (4), 3) ионосферная реакция будет значительно изменяться от суток к суткам в силу того, что период волны Пуанкаре не кратен 24 ч [4]. На рисунке 3 представлены результаты расчетов реакции ионосферы в средних широтах, когда атмосферный канал для распространения волн Пуанкаре поддерживается несколько суток. Как видно, ионосферная реакция существенно изменяется от суток к суткам и положительные всплески ТЕС могут проявляться на значительном удалении по времени от начала термосферного возмущения и объясняют необычные ионосферные возмущения 20.05.2005 (см. рис. 1).

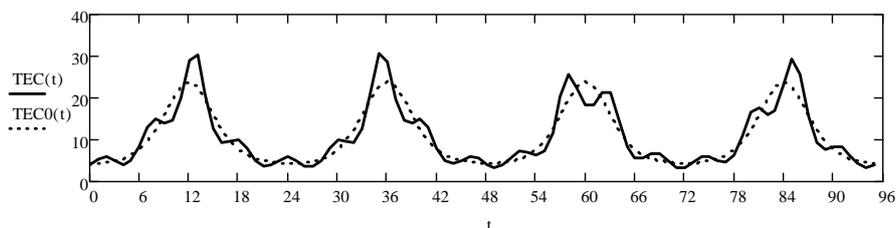


Рис. 3. Суточные вариации ТЕС в присутствии волны Пуанкаре (сплошная линия), спокойные условия (пунктирная линия).

Заключение

В статье обращено внимание на часто регистрируемые в наблюдениях ТЕС планетарные особенности реакции ионосферы на геомагнитные бури. Интерпретация этих явлений основана на распространении планетарных волн Пуанкаре с периодами 4–6 ч. Выполненные оценки показывают, что стоячие волны Пуанкаре позволяют качественно объяснить: возрастание амплитуды возмущений ТЕС в средних широтах, долготные различия в реакции ионосферы, изменчивость суточных вариаций ТЕС от суток к суткам.



Список литературы

1. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. М., 1984.
2. Карпов И.В., Бессараб Ф.С., Лебле С.Б. Операторы проектирования для волн Россби и Пуанкаре // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2007. Вып. 4. С. 76–79.
3. Карпов И.В., Лебле С.Б. Аналитическая теория ионосферного эффекта ВГВ в F2-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26, № 2. С. 234–237.

Об авторах

И. В. Карпов – д-р физ.-мат. наук, проф., РГУ им. И. Канта.
И. И. Шагимурагов – канд. физ.-мат. наук, директор ЗО ИЗМИРАН.

Authors

I. Karpov – Prof., head of the Department of Theoretical Physics, IKSUR.
I. Shagimuratov – head of the Western Division of the Institute of Terrestrial Magnetism Ionosphere and Radiowave.