



И. В. Карпов, О. П. Сусллова, Дж.-П. Василевска

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ В ПЕРИОДЫ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Рассмотрены возможности физической интерпретации глобальных возмущений ионосферы в периоды геомагнитных бурь и после их окончания на основе волн Пуанкаре, возбуждаемых в атмосфере в этих условиях. Для среднеширотных станций, расположенных в европейском долгом секторе, определены спектры вариаций возмущений суточных вариаций ТЕС. Показано, что в спектрах вариаций присутствуют гармоники с периодами, соответствующими стоячим планетарным волнам Пуанкаре. Анализ широтной структуры амплитуд и периодов таких гармоник качественно согласуется с теоретическими оценками для волн Пуанкаре.

54

The paper discusses the possibility of physical interpretation of the global ionosphere disturbances during geomagnetic storms, and after them, based on Poincare waves excited in the atmosphere under such conditions. The spectrum of the diurnal variations TEC perturbations were obtained for the mid-latitude stations located in the European longitude sector. It is shown that in the spectrum of TEC variations are present harmonics with periods of the relevant standing planetary waves Poincare. Analysis of the latitudinal structure of amplitudes and periods of the harmonics shown a qualitative agreement with theoretical estimates for the Poincare waves.

Ключевые слова: планетарные волны Пуанкаре, ионосфера, геомагнитная буря, полное содержание электронов.

Key words: planetary Poincare waves, ionosphere, geomagnetic storms, total electron content.

Введение

В наблюдениях ионосферного параметра ТЕС ("Total Electron Content") установлено, что в периоды геомагнитных бурь в ионосфере на средних широтах возникают возмущения с периодами 4–9 ч. Эти возмущения продолжаются в течение нескольких суток после окончания бури и носят планетарный характер. В работах [1; 2] предложена физическая интерпретация таких возмущений, основанная на предположении о возбуждении в атмосфере планетарных волн Пуанкаре, и изучены особенности пространственно-временной структуры возмущений атмосферы и ионосферы вследствие распространения таких волн.

Цель данной статьи — дальнейшее развитие представлений о волновой природе динамики планетарных возмущений ионосферы и экспериментальное подтверждение существования волн Пуанкаре в атмосфере.



Результаты наблюдений

В работе рассмотрены возмущения суточных вариаций ТЕС на среднеширотных станциях в европейском долготном секторе в период геомагнитной бури 22.08.2005. В качестве исходного материала служили данные о полном электронном содержании ионосферы ТЕС, полученные по регулярным GPS-наблюдениям международной сети станций по изучению геодинамики IGS ("International Geodynamics Service"). Как известно, GPS-техника обеспечивает измерение групповых и фазовых задержек сигналов на частотах $L_1 = 1575$ МГц и $L_2 = 1228$ МГц с 30-секундным интервалом одновременно для всех спутников, находящихся в зоне радиовидимости над отдельной станцией. Методика определения параметра ТЕС по наблюдениям сигналов навигационных спутников приведена в трудах [1; 3]. В статье рассмотрены вариации ТЕС в период 22–26.08.2005. В целом этот период соответствовал умеренно возмущенной геомагнитной обстановке. Сильная магнитная буря была отмечена 22.08.2005. Максимальное значение Кр-индекса достигало значения 7, сумма суточного Кр равнялась 27. Возмущенные условия продолжались до 25.08.2005 с последующим снижением уровня геомагнитной активности до спокойного. На рисунке 1, а приведен пример суточных вариаций ТЕС на среднеширотной станции МАТЕ (40° N, 16° E).

55

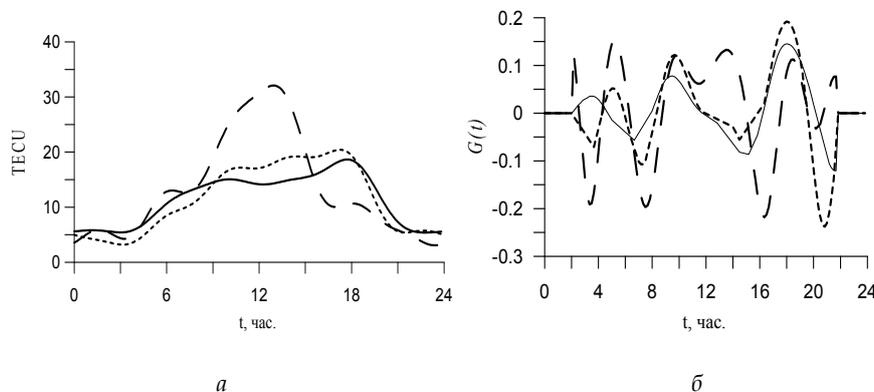


Рис. 1. Суточные вариации ТЕС и функции $G(t)$ на станции МАТЕ (40° N, 16° E) 23–25.08.2005:

а – суточные вариации ТЕС; б – вариации $G(t)$. Сплошная линия – 23.08.2005, длинные штрихи – 24.08.2005, короткие штрихи – 25.08.2005

Анализ наблюдений

Цель анализа наблюдений – выделение вклада атмосферных возмущений в наблюдаемых суточных вариациях ТЕС. В [1; 2] получены выражения для расчета изменения вертикальной составляющей ионосферного дрейфа по отношению к невозмущенному дню:



$$N(t) = N_0(t) \exp\left(-\frac{UH}{D}\right); F(t) = \ln\left(\frac{N(t)}{N_0(t)}\right), \quad (1)$$

где $N(t)$ – возмущенная суточная вариация ТЕС; $N_0(t)$ – невозмущенная суточная вариация ТЕС; U – вертикальная компонента скорости ионосферного дрейфа; H – высота однородной атмосферы; D – коэффициент амбиполярной диффузии; $F(t)$ – линейная функция скорости ионосферного дрейфа.

Ионосферный дрейф в ионосфере F -области определяется главным образом меридиональной составляющей ветра в атмосфере, и следовательно, расчеты по (1) определяют атмосферный вклад в наблюдаемое возмущение ионосферы. Поскольку в работе предполагается выделить вклады вариаций с периодом волн Пуанкаре ($\sigma < f = 2\Omega \cos(\theta)$; $\Omega = 2\pi/24$, где θ – коширота) $\Omega = 2\pi/24$, θ – коширота), то для $F(t)$ выполнена процедура скользящего сглаживания (2) с окном $T = 4$ ч, которая использует формулы

$$G(t) = F(t) - \overline{F(t)}; \overline{F(t)} = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} F(\tau) d\tau \quad (2)$$

Результаты расчетов, выполненных на основе формул (1; 2), представлены на рисунке 1, б и показывают, что вариации $G(t)$ являются периодическим процессом.

Для станций, расположенных в европейском долготном секторе, был выполнен гармонический анализ суточных вариаций $G(t)$. На рисунке 2, а показаны типичные спектры вариаций $G(t)$ по наблюдениям станции МАТЕ. Из анализа спектров вариаций видно, что возмущения суточных вариаций ТЕС определяются усилением гармоник с периодами $\tau \sim 4-5$ ч и $\tau \sim 6-8$ ч (рис. 2, а).

На рисунке 2, б приведена широтная зависимость периодов спектральных составляющих, определяющих возмущение суточных вариаций ТЕС, которая выявлена по наблюдениям нескольких станций в европейском секторе. Полученные результаты показывают, что широтная зависимость периодов спектральных составляющих вариаций вполне согласуется с широтной зависимостью периодов для стоячих планетарных волн Пуанкаре, представленной в работе [2]. В реальной ионосфере широтная зависимость периодов волн Пуанкаре будет определяться изменением с широтой температуры термосферы. В условиях геомагнитных возмущений широтное распределение температуры характеризуется минимумом на средних широтах вследствие нагрева полярной шапки. В области широтного минимума температуры будет отмечено увеличение периодов волн Пуанкаре по сравнению с периодами волн на более северных и южных станциях. Эта тенденция отчетливо выражена на рисунке 2, б на широтах $40^\circ - 55^\circ$.

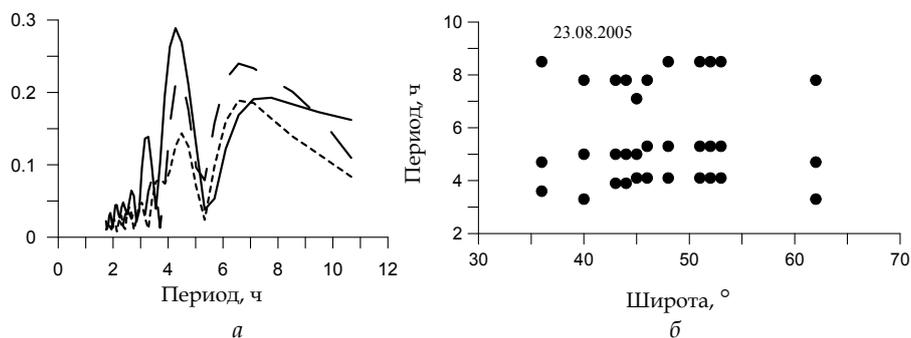


Рис. 2:
 а — спектр вариаций $G(t)$ для станции МАТЕ 23–25.08.2005, обозначения такие же, как и на рисунке 1; б — периоды вариаций на различных широтах для 23.08.2005, точками показаны результаты, определенные по наблюдениям станций

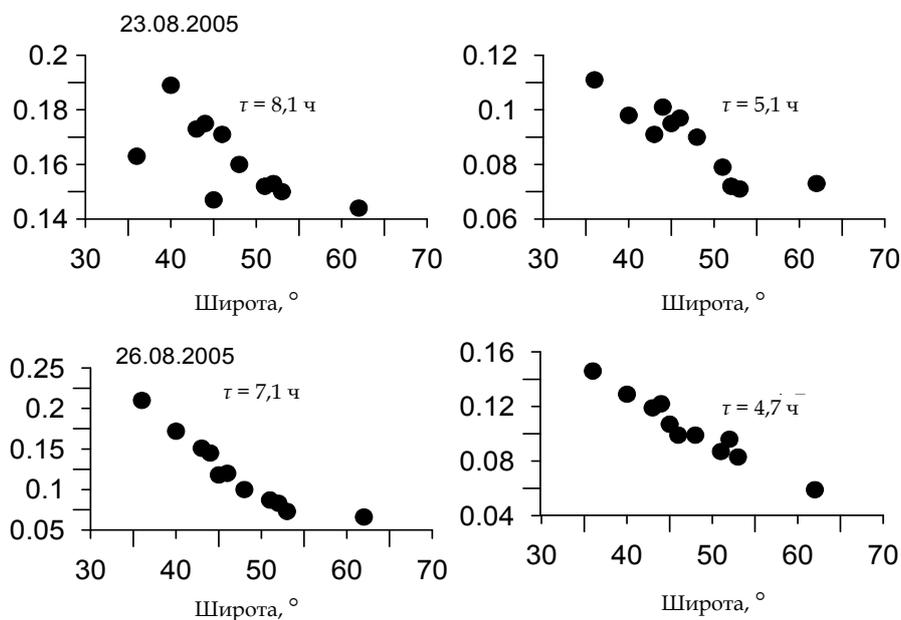


Рис. 3. Амплитуда гармоник с периодами волн Пуанкаре на различных широтах. Точками показаны значения амплитуд и результаты, определенные по наблюдениям отдельных станций

На рисунке 3 показана широтная структура амплитуд спектральных составляющих вариаций возмущений ТЕС — $G(t)$ с периодами волн Пуанкаре, полученная по наблюдениям среднеширотных станций в Европе для двух дней в течение рассматриваемого периода. На верхних рисунках представлены амплитуды спектральных составляющих возмущений ТЕС с периодами $\tau = 8,1, 5,1$ ч после окончания магнитной бури 21.08.2005. Для послебуревых дней можно отметить нарушения в регулярности изменений амплитуды с широтой, особенно для медленных вариаций. Через несколько дней после бури (26.08.2005) картина изменения амплитуд спек-



тральных составляющих с широтой становится в целом регулярной. Из теоретических оценок [1; 2] известно, что широтная структура волн Пуанкаре является функцией синуса вида $\sin(l\theta)$, где l — меридиональное волновое число, определяемое шириной канала и номером моды [1]. Как видно из рисунка 3, амплитуды спектральных составляющих возрастают с уменьшением широты, и на изученном широтном интервале они могут быть очень точно описаны такими функциями. Укажем также на некоторое различие в периодах спектральных составляющих. Как уже говорилось, период волны Пуанкаре существенно зависит от скорости звука и, следовательно, от средней температуры термосферы. Вследствие диссипации энергии атмосферных возмущений температурные эффекты в термосфере будут проявляться через некоторое время после окончания бури. Значит, различие в периодах спектральных составляющих вариаций может быть связано с нагревом термосферы на средних широтах. Отметим также, что широтная структура медленных вариаций менее устойчива к геомагнитным возмущениям, чем структура быстрых вариаций.

Обсуждение результатов

Полученные из анализа наблюдений спектральные характеристики возмущений ТЕС позволяют определить важные характеристики параметров волн Пуанкаре, которые могут возбуждаться в атмосфере в рассмотренных условиях. Дисперсионное соотношение для волн Пуанкаре имеет следующий вид:

$$\sigma_n = \pm c \left((f/c)^2 + k^2 + l_n^2 + \beta^2/4 \right)^{1/2}, \quad (3)$$

где $k = s/R \sin \theta$ — волновое число для стоячих волн Пуанкаре; $s = 1, 2, \dots$ — зональное волновое число; $\beta = \sin \theta / R$ — параметр кривизны; $l_n = n\pi / L$ — волновое число в поперечном (меридиональном) направлении к оси канала; L — ширина канала; n — целое; c — скорость звука; R — радиус Земли; $f = 2\Omega \cos \theta$ — фактор Кориолиса.

Отметим, что в соотношение (3) входят свободные параметры, существенно влияющие на период волны: L , n и s — ширина канала, меридиональное и зональное волновые числа. Применяя (3) и полученные широтные зависимости для спектральных составляющих вариаций (рис. 2), можно оценить неизвестные параметры, соответствующие волнам Пуанкаре.

Предположим, что спектральные характеристики наблюдаемых вариаций определяются суперпозицией волн, распространяющихся в атмосферном волновом канале. Зная спектр вариаций на одной широте (наблюдения одной станции), можно оценить значения свободных параметров. Естественно предположить, что различные временные составляющие в спектре вариаций на одной станции являются гармониками из спектра волн, которые могут быть реализованы в атмосферном канале. Таким образом, быстрая (4–5 ч) и медленная (6–8 ч) составляющие вариаций отличаются частотой и компонентами волнового вектора, а ширина канала одинакова для всех спектральных составляющих. Спектр вариаций, соответствующий волнам Пуанкаре, должен зависеть от этих параметров и широты согласно (3). Результаты сравнения расчетов по-



звоняют оценить справедливость предположения о роли волн Пуанкаре в формировании наблюдаемых вариаций ионосферы.

Такие расчеты были выполнены и показано, что наблюдается удовлетворительное согласие спектров вариаций возмущений ТЕС на различных широтах при ширине канала $L \sim 12\,000$ км и для волн Пуанкаре с компонентами волнового вектора $n = 1, 2$; $s = 1, 2$. Эти результаты дополняют работу [4], где аналогичные выводы были получены при анализе вариаций другой магнитной бури. Оценка ширины канала позволяет утверждать, что в периоды геомагнитных возмущений атмосферный канал формируется между полярными шапками.

Заключение

Таким образом, проведенное исследование выявило, что возмущение суточных вариаций параметра ТЕС на средних широтах в период геомагнитных бурь определяется усилением вариаций с периодами 4–5 ч и 6–8 ч. Возмущенные значения амплитуд таких вариаций сохраняются в течении нескольких суток после окончания геомагнитной бури.

Анализ широтной изменчивости спектральных составляющих показывает качественное согласие экспериментальных результатов с теоретическими оценками изменчивости характеристик стоячих планетарных волн Пуанкаре в атмосферном волновом канале шириной около 12 тыс. км. Существование атмосферного канала в условиях геомагнитных возмущений обусловлено повышенным разогревом полярных областей.

Список литературы

1. Карпов И. В., Шагимуратов И. И., Якимова Г. А. Ионосферные эффекты волн Пуанкаре в наблюдениях полного электронного содержания // Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49, № 5. С. 653–659.
2. Карпов И. В., Шагимуратов И. И. Ионосферные эффекты волн Пуанкаре // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2009. Вып. 4. С. 86–91.
3. Афраймович Э. Л., Первалова Н. П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, 2006.
4. Karpov I. V., Shagimuratov I. I., Yakimova G. A. Ionospheric effects of poicare waves // International conference "Fundamental Space Research": Conf. proc. Sunny Beach, 2008. P. 75–77.

Об авторах

Иван Викторович Карпов — д-р физ.-мат. наук, проф., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Ольга Павловна Сулова — асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

Джоанна-Паулина Василевска — студ., Гданьский политехнический университет.

Authors

Ivan Karpov — Dr., Prof., I. Kant Baltic Federal University.

Olga Suslova — PhD student, I. Kant Baltic Federal University.

Johanna-Paulina Vasilevska — student, Gdansk, polytechnical university.