

УДК 550.388

ИССЛЕДОВАНИЕ СУТОЧНОГО ХОДА «ВЕРТИКАЛЬНОГО» ПЭС В СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

А.С. Полякова

INVESTIGATION INTO DIURNAL VARIATION OF «VERTICAL» TEC UNDER QUIET GEOMAGNETIC CONDITIONS

A.S. Polyakova

Изучено поведение полного электронного содержания (ПЭС) в спокойных гелиогеомагнитных условиях в различных широтно-долготных секторах в разные сезоны года на основе данных глобальных карт GIM. Получены статистические данные о величине минимального и максимального значений ПЭС в течение суток, а также значения суточной амплитуды вариаций ПЭС в различные сезоны года. Проведено сравнение распределений ПЭС с распределениями критической частоты ионосферного слоя F2. Выполнено сравнение полученных распределений с данными регистрации ПЭС с помощью геостационарного ИСЗ ATS-3. Проанализирована зависимость вариаций ПЭС от уровня солнечной активности.

We studied behavior of Total Electron Content (TEC) under quiet heliogeomagnetic conditions in various longitude and latitude sectors in different seasons, using Global Ionospheric Maps (GIM). Statistical data about minimum and maximum TEC values during 24 hours and daily TEC amplitude variations in different seasons were obtained. We made comparison between distributions of TEC and F2 ionospheric layer critical frequency. Obtained distributions were also compared to the TEC registration data, using data from the geostationary satellite ATS-3. Dependence of TEC variations from solar activity level was analyzed.

Введение

Исследования ионосферы с помощью спутниковой радионавигационной системы GPS ведутся уже более десяти лет. По измерениям GPS-приемников изучаются возмущения полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере, вызванные различными факторами. Разработана технология построения глобальных карт абсолютного «вертикального» ПЭС (GIM), которая позволяет получить общую картину распределения ионизации вокруг земного шара. При использовании ПЭС для диагностики и прогнозирования состояния ионосферы важным является исследование морфологии поведения ПЭС в спокойных гелиогеомагнитных условиях. Суточные вариации ПЭС в спокойных условиях на отдельных приемных станциях или в отдельных регионах изучались как с помощью низкоорбитальных и геостационарных ИСЗ, так и с помощью спутниковой радионавигационной системы GPS. Целью настоящей работы является статистическая оценка параметров суточного хода «вертикального» ПЭС, характерных для различных широтно-долготных секторов в различные сезоны года в спокойных гелиогеомагнитных условиях.

Данные и методы анализа

Исследование суточного поведения ПЭС проводилось по данным глобальных карт GIM (Global Ionospheric Maps). Технология GIM обеспечивает построение глобальных карт абсолютного «вертикального» значения ПЭС I_V путем интерполяции данных, получаемых на мировой сети приемников GPS [1, 2]. Для хранения и передачи карт GIM в цифровом виде разработан стандартный формат IONEX. Карты ПЭС в формате IONEX представлены на сайте <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>. Пример GIM приведен на рис. 1, где оттенками серого цвета показано распределение ПЭС в 12:00 UT 20 марта 2005 г.

Для исследования характера суточных и сезонных

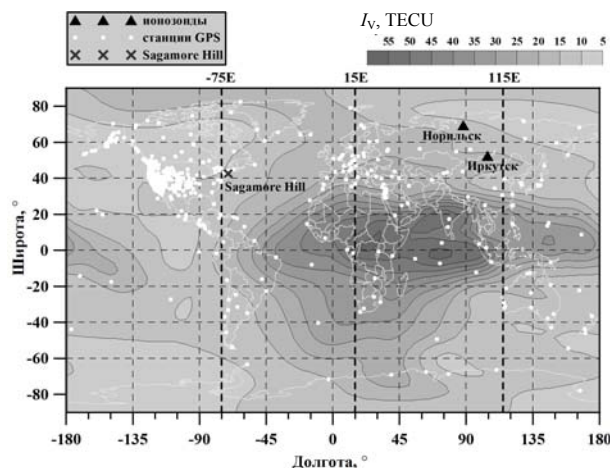


Рис. 1. Глобальное распределение ПЭС I_V (GIM) в 12:00 UT 20 марта 2005 г. Точками отмечено положение приемников GPS, треугольниками – ионосферных станций.

вариаций ПЭС в спокойных условиях были выбраны четыре года (2005–2008) с низким уровнем солнечной активности. Рассматривались суточные вариации ПЭС для четырех месяцев, соответствующих наиболее стабильным условиям в ионосфере: март, сентябрь, июнь, декабрь. В каждом месяце проводилось усреднение суточных вариаций ПЭС за 10 дней с наиболее спокойными геомагнитными условиями (значение индекса K_p не превышали 3, а индекс D_{st} не опускался ниже -50 нТл). Данные о поведении индексов D_{st} , K_p получены на сайте <http://clust1.wdcb.ru/spidr/index.jsp>.

С целью уменьшения погрешности интерполяции данных, применяемой в GIM, рассматривались вариации ПЭС на трех долготах, вблизи которых имеется наибольшее количество приемников GPS как в Северном, так и в Южном полушариях: -75° E (Америка), $+15^\circ$ E (Европа), $+115^\circ$ E (Азия). Указанные долготы отмечены толстыми штриховыми линиями на рис. 1. С учетом сильной изменчивости ионизации с широтой строились суточные вариации ПЭС, усредненные в трех широтных поясах: экваториальном

(0–20°), среднеширотном (40–55°), высокоширотном (60–87.5°).

Таким образом, в результате статистической обработки для трех выбранных долгот в Северном и Южном полушариях были получены суточные вариации ПЭС для четырех сезонов, усредненные в трех диапазонах широт и по выбранным интервалам времени периода 2005–2008 гг.

Суточные вариации «вертикального» ПЭС

На рис. 2 в качестве примера показаны усредненные суточные вариации ПЭС, рассчитанные по картам GIM, в Северном полушарии для четырех сезонов года на трех исследуемых долготах: –75° E, 15° E, 115° E. Вертикальными отрезками отмечено среднеквадратичное отклонение (СКО).

В экваториальных широтах изменения ПЭС в течение суток наиболее значительны. Средняя амплитуда суточных вариаций ПЭС составляет 25 TECU, ее значение меняется в течение года: от 30–35 TECU в марте до 15–20 TECU зимой. Величина суточного максимума ПЭС колеблется от 20–25 TECU зимой до 35–42 TECU в периоды равноденствия. Максимум значений ПЭС регистрируется около 14 ч местного времени (LT). Минимум ПЭС (5–7 TECU) наблюдается в 05 LT. В пределах СКО суточные вариации на трех долготах идентичны.

На средних широтах амплитуда суточных вариаций ПЭС (7–9 TECU) в 2.5–3 раза меньше, чем на экваториальных. Сезонный ход выражен слабо и

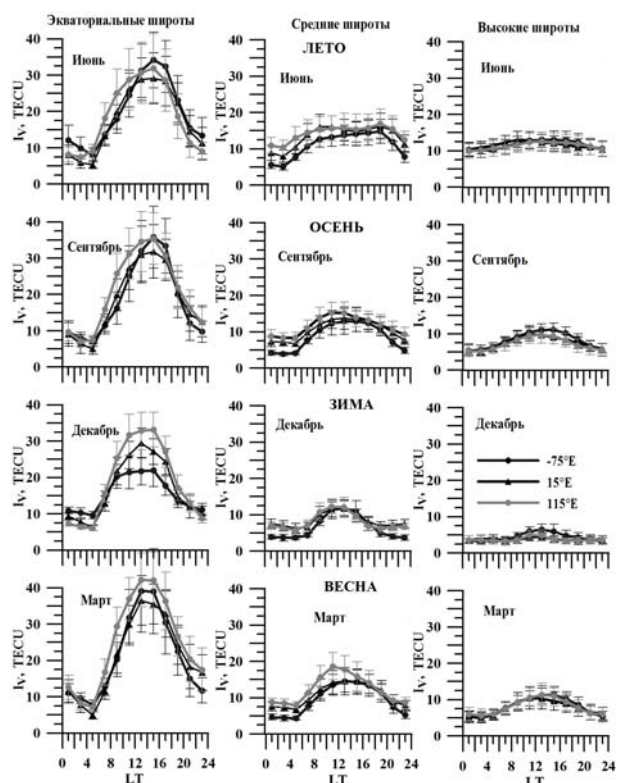


Рис. 2. Усредненные суточные вариации «вертикального» ПЭС, рассчитанные по картам GIM, в Северном полушарии в экваториальных (слева), средних (по центру) и высоких (справа) широтах для четырех сезонов года. Толстыми линиями с маркерами показаны вариации ПЭС на трех долготах: –75° E, 15° E, 115° E. Вертикальными отрезками отмечено СКО.

проявляется главным образом в изменении характера суточного хода. Осенью, зимой и весной максимум ПЭС (~14–15 TECU) приходится на 14–15 LT. Минимум значений ПЭС (6–7 TECU) наблюдается в районе 03–05 LT. Особый характер суточный ход ПЭС имеет летом. В европейском (15° E) и азиатском (115° E) секторах около 14–15 LT в поведении ПЭС наблюдается локальный минимум. Максимум значений ПЭС на всех долготах смещен к 19 LT.

В высоких широтах суточные изменения ПЭС выражены слабее всего: амплитуда суточных вариаций варьирует от 2 TECU (зимой и летом) до 5–6 TECU (осенью и весной), это в 5–10 раз меньше, чем в экваториальных широтах. Суточные вариации ПЭС в различных долготных секторах практически совпадают. Минимальные значения ПЭС (~10 TECU летом и ~5 TECU в другие сезоны) наблюдаются в течение ночи (00–07 LT и 00–04 LT соответственно). Суточный максимум ПЭС весной и осенью составляет около 10 TECU и приходится на 14 LT. Зимой и летом максимум располагается около 13 LT, но выражен очень слабо.

В Южном полушарии наблюдается аналогичная картина, за исключением летних вариаций: на долготе –75° E вариации ПЭС демонстрируют аномальное поведение с хорошо выраженным минимумом в дневные часы.

Сравнение с измерениями ПЭС по данным геостационарного ИСЗ ATS-3

В обзоре [3] приведены ежедневные суточные вариации «наклонного» ПЭС в 1971 г., полученные на станции Sagamore Hill (70.8° W; 42.6° N), принимавшей сигналы геостационарного ИСЗ ATS-3 (рис. 1).

На рис. 3 тонкими черными линиями изображены ежедневные графики суточного хода ПЭС по данным [3], серыми линиями показаны усредненные кривые хода «вертикального» ПЭС (I_v) и «наклонного» ПЭС (I), рассчитанного из I_v по формуле [4] $I = I_v / \sin \theta_s$. Во время измерений ионосферная точка (точка пересечения луча «приемник–ATS-3» со сферой на высоте максимума ионизации) имела координаты 38.7° W; 70.7° N и высоту 420 км [3], следовательно, угол места луча «приемник–ATS-3» был равен $\theta_s = 42.2^\circ$.

Характер полученного нами суточного хода ПЭС совпадает с данными [3], причем «наклонное» ПЭС более точно соответствует данным [3]. Отдельно построены неусредненные суточные вариации «наклонного» ПЭС для 2005 г. (I_{2005}), уровень солнечной активности которого (среднегодовой индекс $F_{10.7} = 91.7$) наиболее соответствует уровню 1971 г. ($F_{10.7} = 106.2$). Наилучшее соответствие наблюдается в марте и декабре. В июне и сентябре дневные значения ПЭС, рассчитанного по картам GIM, несколько выше, чем по данным [3]. Вероятно, это является следствием мощных геомагнитных возмущений, регистрировавшихся в эти месяцы.

Суточные вариации «вертикального» ПЭС и критической частоты слоя F2 ионосферы

Поведение ПЭС сравнивалось с суточными вариациями критической частоты f_0F2 ионосферного

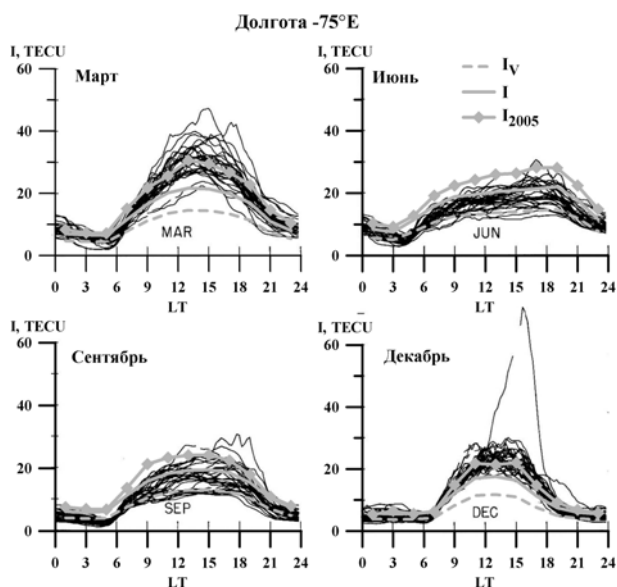


Рис. 3. Сравнение усредненных суточных вариаций ПЭС, рассчитанных по картам GIM (серые кривые), с измерениями ПЭС по данным геостационарного ИСЗ ATS-3 в 1971 г. [3] (черные кривые).

слоя F2, которая является функцией электронной концентрации в максимуме ионизации. С этой целью использовались данные вертикального зондирования, полученные на ионосферных станциях Иркутск (52.4° N; 104.3° E) и Норильск (69.4° N; 88.1° E). Суточные вариации f_0F_2 усреднялись за те же периоды, в которые проводилось усреднение суточного хода ПЭС. Из рис. 4 видно, что характер суточного хода ПЭС, рассчитанный по картам GIM, повторяет характер суточных вариаций критической частоты. Это лишний раз подтверждает, что основной вклад в ПЭС вносит область ионосферы, расположенная в окрестностях главного максимума ионизации. Кроме того, в суточных вариациях f_0F_2 наблюдаются те же особенности, которые были отмечены выше (п. 3). Аномальные явления в суточных вариациях f_0F_2 в указанных секторах хорошо известны [5–7]. Теоретические расчеты и моделирование [5, 6] показали, что наблюдаемые эффекты являются следствием системы атмосферных ветров.

Связь амплитуды суточных вариаций «вертикального» ПЭС с уровнем солнечной активности

Проанализирована связь величины суточного максимума и амплитуды вариаций «вертикального» ПЭС с уровнем солнечной активности. С 2005 по 2008 г. в экваториальных широтах наблюдается снижение величины амплитуды и максимума суточных вариаций относительно уровня 2005 г. на 40–45 %, а на средних и высоких широтах – на 40–43 % во все сезоны. В то же время с 2005 по 2008 г. произошло падение интенсивности потока радиационного излучения Солнца в среднем на 25 %. Как и следовало ожидать, снижение уровня солнечной активности приводит к уменьшению величины суточного максимума и амплитуды вариаций ПЭС. Зависимость величины максимума и амплитуды суточных вариаций ПЭС от солнечной активности в экваториальных широтах выражена сильнее, чем в средних и высоких широтах.

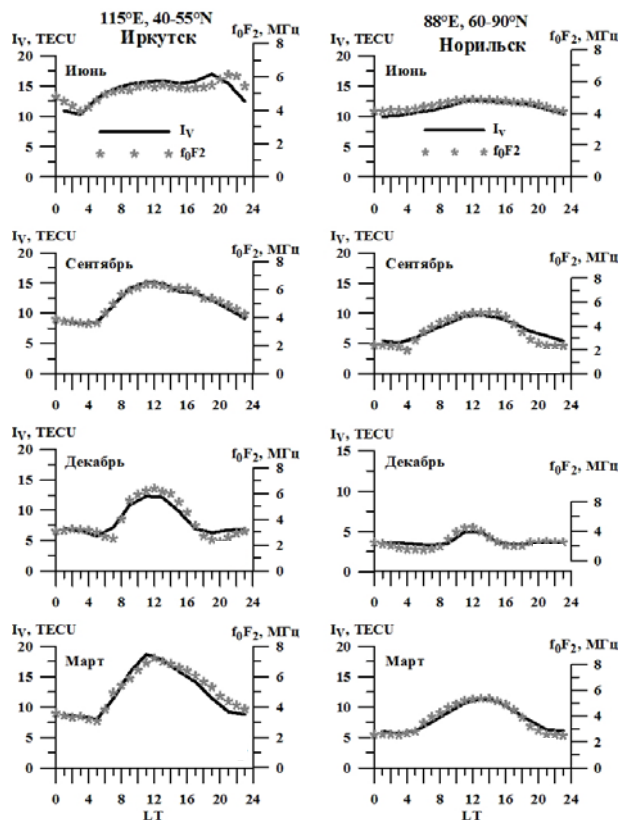


Рис. 4. Сравнение усредненных суточных вариаций «вертикального» ПЭС, рассчитанных по картам GIM (черные кривые), и суточного хода критической частоты слоя F2 ионосферы (звездочки) на средних (слева) и высоких (справа) широтах в Восточно-Сибирском регионе.

Заключение

На основе анализа карт GIM проведено исследование характера суточного хода «вертикального» ПЭС в спокойных гелиогеомагнитных условиях в различных сезонах и в различных широтно-долготных секторах.

Установлено, что величина ночного минимума ПЭС лежит в пределах 5–7 TECU независимо от сезона, широты и долготы местности. Минимального значения ПЭС достигает около 05 LT. Максимум суточного хода ПЭС регистрируется в 14–15 LT. Величина максимума составляет 38 ± 5 TECU в экваториальных широтах, 14 ± 2 TECU на средних широтах, 10 ± 2 TECU в высоких широтах.

Определено, что наибольшие вариации ПЭС наблюдаются в экваториальных широтах, наименьшие – в высоких. Максимальное значение амплитуды вариаций регистрируется в марте, минимальное – в декабре. Долготные вариации практически не наблюдаются.

Сравнение усредненных суточных вариаций «вертикального» ПЭС с поведением критической частоты слоя F2 ионосферы и данными регистрации ПЭС с помощью геостационарного ИСЗ ATS-3 показало, что, несмотря на применяемую интерполяцию, карты GIM дают адекватную картину поведения ионизации в спокойных гелиогеомагнитных условиях.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 08-02-90437-Укр). Автор выражает благодарность По-

лех Н.М., Пирог О.М. и Воейкову С.В. за помощь в получении данных и полезное обсуждение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mannucci A.J., Ho C.M., Lindqwister U.J. A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33, N 8. P. 565–582.
2. Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The Ionosphere Map EXchange Format Version 1 // *Proc. IGS AC Workshop. Germany, Darmstadt. February 9–11. 1998. P. 23–247.*
3. Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* 2006. V. 44. RG4001, doi:10.1029/2005RG000193
4. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
5. Kohl H., King J.W. Atmospheric winds between 100 and 700 km and their effects on the ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1967. V. 29. P. 1045–1062.
6. Ветер в ионосфере /Под ред. Казимировского Э.С. Л.: ГИМИЗ, 1969. 224 с.
7. Pirog O.M., Polekh N.M., Chistyakova L.V. Longitudinal variation of critical frequencies in polar F-region // *Adv. Space Res.* 2001. V. 27, N 8. P. 1395–1398.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск