

# СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В СПОКОЙНЫХ ГЕЛИОГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ

<sup>1</sup>Н.П. Перевалова, <sup>1</sup>А.С. Полякова, <sup>2</sup>А.В. Зализовский

## DIURNAL VARIATIONS OF THE VERTICAL TOTAL ELECTRON CONTENT UNDER QUIET HELIOGEOMAGNETIC CONDITIONS

<sup>1</sup>N.P. Perevalova, <sup>1</sup>A.S. Polyakova, <sup>2</sup>A.V. Zalizovsky

На основе анализа карт GIM проведено исследование характера суточного хода вертикального ПЭС в спокойных гелиогеомагнитных условиях, отражающего фоновое поведение ионизации. Получены статистические оценки максимального и минимального значения ПЭС в течение суток, а также амплитуды суточных вариаций ПЭС в различные сезоны в различных широтно-долготных секторах. 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.

We studied character of diurnal variation of the vertical total electron content (TEC) under quiet heliogeomagnetic conditions using the GIM map analysis. This variation reflects the background behaviour of ionization. We obtained statistical estimates of maximum and minimum TEC values within 24 hours along with amplitudes of diurnal TEC variations for different latitude-longitude sectors and for different seasons. Averaged diurnal variations of the vertical TEC were compared with behaviour of the F2-layer critical frequency and TEC registration data using the geostationary satellite ATS-3. The comparison showed that, despite the interpolation, GIM maps provide an adequate picture of the ionization behaviour under quiet heliogeomagnetic conditions.

### 1. Введение

Важной характеристикой ионосферы является полное электронное содержание (ПЭС), которое можно определять по характеристикам трансионосферных радиосигналов. Использование ПЭС для диагностики и прогнозирования состояния ионосферы требует, в первую очередь, изучения морфологии поведения ПЭС в спокойных гелиогеомагнитных условиях. Исследования характера суточного хода ПЭС в спокойных условиях на отдельных приемных станциях или в отдельных регионах проводились как с помощью низкоорбитальных и геостационарных ИСЗ, так и с помощью спутниковой радионавигационной системы GPS. В обзоре [Mendillo, 2006] основное внимание уделялось возмущениям ПЭС во время магнитосферных бурь, но для описания фонового поведения ионизации использовались среднемесячные суточные вариации ПЭС или длительные (в течение года) измерения ПЭС, полученные на североамериканских станциях, регистрирующих сигналы низкоорбитальных и геостационарных ИСЗ. Детальный анализ пространственно-временных вариаций ПЭС над штатом Виктория (Австралия) в 2004 г. выполнен авторами [Wu, et al., 2006] по данным сети наземных приемников GPS. Показано, что суточный максимум ПЭС регистрируется около 14:00, а минимум – около 03:00 LT. Время наблюдения и величина максимума/минимума ПЭС варьировались в зависимости от сезона. Весной и осенью дневные значения ПЭС (~25 TECU), в целом, были выше, чем летом и зимой (15–18 TECU), а зимние значения превышали летние (зимняя аномалия). В ночное время зимняя аномалия не наблюдалась [Wu, et al., 2006]. Исследование характеристик суточного, полугодового хода ПЭС и зимней аномалии по данным китайской сети GPS-приемников в период 2000–2002 гг. выполнено в [Huo, et al., 2005]. Давно и активно ведется изучение поведения ПЭС в Индии. Последние рабо-

ты в этом направлении были посвящены исследованиям суточных вариаций ПЭС на индийской сети приемников GPS в период низкой солнечной активности 2004–2007 гг. [Ramo Rao, et al., 2006; Bagiya, et al., 2009]. Установлено, что на станциях, расположенных в зоне экваториальной аномалии (15–25° N), ПЭС резко возрастало в утренние часы и достигало максимума между 13:00 и 16:00 LT. Величина максимума менялась от 80–90 TECU в периоды равноденствия до 40–50 TECU зимой и летом [Ramo Rao, et al., 2006; Bagiya, et al., 2009]. Вблизи экватора суточный ход ПЭС был более пологим, максимум (~50 TECU) наблюдался около 16:00 LT [Ramo Rao, et al., 2006]. Суточный минимум (~5 TECU) регистрировался в период 05:00–06:00 LT на всех станциях [Ramo Rao, et al., 2006; Bagiya, et al., 2009]. Поведение ПЭС в невозмущенных геомагнитных условиях, но при высоком уровне солнечной активности (1982–1983 гг.) обсуждалось в работе [Mansilla, et al., 2005]. Авторы [Mansilla, et al., 2005] использовали данные измерений ПЭС с помощью сигналов геостационарных ИСЗ и измерения критической частоты  $f_oF2$  на приэкваториальной станции Тукуман в Южной Америке. Независимо от сезона суточный максимум ПЭС регистрировался между 14:00 и 18:00 LT. Наибольшие значения ПЭС наблюдались в периоды равноденствия (особенно весеннего). Зимой дневные значения ПЭС были на 12–15 % выше, чем летом. Характер поведения электронной концентрации в максимуме слоя F2, рассчитанной по измерениям  $f_oF2$ , показал высокую степень подобия суточным вариациям ПЭС [Mansilla, et al., 2005]. Высокая корреляция (коэффициент корреляции выше 0.8) суточных изменений ПЭС и  $f_oF2$  отмечена также авторами [Kouris et al., 2004] на основе измерений ПЭС и  $f_oF2$  в Италии в 1976–1999 гг.

Развитие сетей наземных приемников GPS и разработка технологии GIM построения глобальных карт абсолютного вертикального ПЭС позволяет

получить общую картину распределения ионизации вокруг земного шара и проследить его динамику. В настоящей работе представлены результаты исследования морфологии вертикального ПЭС в спокойных геофизических условиях, выполненного на основе анализа обширного материала, который предоставляют карты GIM. Получены статистические оценки параметров суточного хода ПЭС, характерных для экваториальных, средних, высоких широт в Северном и Южном полушариях на различных долготах в различные сезоны года. Для краткости изложения в работе (кроме случаев, оговоренных особо) под ПЭС имеется в виду абсолютное вертикальное ПЭС.

## 2. Данные и методы анализа

1. 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 [Mannucci, et al., 1998; Schaer, et al., 1998]. Для хранения и передачи карт GIM в цифровом виде разработан стандартный формат IONEX. Каждый файл IONEX содержит мировые карты  $I_V$  (за один сутки по шкале мирового времени UT с временным разрешением 2 ч). Пространственный диапазон карт составляет от  $-180^\circ$  до  $180^\circ$  по долготе и от  $-87.5^\circ$  до  $87.5^\circ$  по широте. Пространственное разрешение карт задается шагом по долготе  $5^\circ$  и шагом по широте  $2.5^\circ$ . Глобальные карты ПЭС в формате IONEX рассчитываются в различных научных центрах, например, в Лаборатории реактивного движения Калифорнийского технологического института (Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology (JPL, [http://www.jpl.nasa.gov])) и в Центре измерения параметров орбиты Университета в Берне, Швейцария (Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland (CODE, [http://www.cx.unibe.ch])). В настоящей работе использовались карты JPL. Карты ПЭС в формате IONEX представлены на сайте [http://www.cx.unibe.ch]. 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 вариаций ПЭС в спокойных условиях были выбраны четыре года (2005–2008) с низким уровнем солнечной активности. Поток радиоизлучения Солнца

на длине волны 10.7 см ( $F10.7$ ) менялся в эти годы от 140 до 65 (в ед.  $10^{22}$  Вт/(Гц·м<sup>2</sup>)). Рассматривались суточные вариации ПЭС для четырех месяцев, соответствующих наиболее стабильным условиям в ионосфере: март, сентябрь (весеннее и осеннее равноденствие), июнь, декабрь (летнее и зимнее солнцестояние). В каждом месяце проводилось усреднение суточных вариаций ПЭС за 10 дней с наиболее спокойными геомагнитными условиями. Спокойными считались условия, когда значение индекса  $K_p$  не превышало 3, а индекс  $D_{st}$  не опускался ниже  $-50$  нТл. Выбранные для усреднения интервалы наблюдений приведены в табл. 1. Данные о поведении индексов  $F10.7$ ,  $D_{st}$ ,  $K_p$  получены на сайте [ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex].

Таблица 1

Периоды, выбранные для исследования				
год \ мес.	март	июнь	сентябрь	декабрь
2005	20–29	01–10	20–29	01–10
2006	21–30	17–26	06–15	18–27
2007	14–23	04–13	08–17	01–10
2008	17–26	03–12	21–30	–

С целью уменьшения погрешности интерполяции данных, применяемой в GIM, мы рассматривали вариации ПЭС на трех долготах, вблизи которых имеется наибольшее количество приемников GPS, как в Северном, так и в Южном полушариях:  $-75^\circ$  Е (Америка),  $+15^\circ$  Е (Европа),  $+115^\circ$  Е (Азия). Указанные долготы отмечены толстыми штриховыми линиями на рис. 1. Учитывая сильную изменчивость ионизации с широтой, отдельно для Северного и Южного полушарий строились суточные вариации ПЭС, усредненные в трех широтных поясах: экваториальный ( $0-20^\circ$ ), среднеширотный ( $40-55^\circ$ ), высокоширотный ( $60-87.5^\circ$ ).

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 за указанные интервалы времени периода 2005–2008 гг.

Поведение ПЭС сравнивалось с суточными вариациями критической частоты  $f_oF2$ , которая является функцией электронной концентрации в максимуме ионизации. С этой целью использовались данные вертикального зондирования, полученные на ионосферных станциях Иркутск, Прухонис (Pruhonice), о. Уоллопс (Wallopse Island), Миллстоун-Хилл (Millstone Hill), Дайес (Dyes), Эгглен (Eglyn), Пуэрто-Рико (Puerto Rico) и на украинской антарктической станции (УАС) «Академик Вернадский». Указанные станции имеют долготы, близкие к долготам, на которых исследовались вариации ПЭС. Координаты ионосферных станций, периоды, за которые получены данные, а также временное разрешение данных приведены в табл. 2. Данные американских ионозондов, а также европейской станции Прухонис были получены в базе DIDB – Digital Ionogram Data Base (база данных цифровых ионограмм), University of Massachusetts, Center for Atmospheric Research Lowell (Массачусетский университет, г. Лоуэлл, Центр атмосферных исследований [http://clust1.wdcb.ru/spidr/index.jsp]), доступ к которой был любезно предоставлен профес-

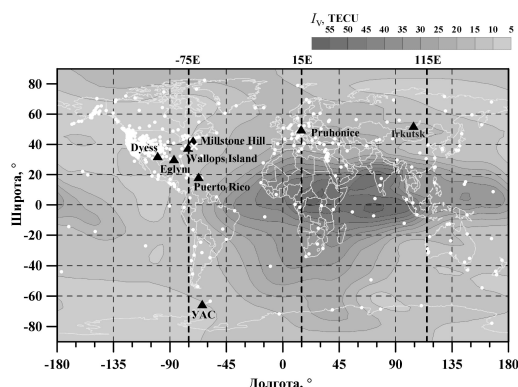


Рис. 1. Глобальное распределение ПЭС  $I_V$  (GIM) в 12:00 UT 20 марта 2005 г. Точками отмечено положение приемников GPS, треугольниками – ионосферных станций.

Таблица 2

Координаты ионосферных станций, периоды, за которые получены данные, временное разрешение данных

Ионозонд	Координаты	Периоды данных	Временное разрешение данных
Иркутск	52.4° N; 104.3° E	20–30.03.2005, 01–11.06.2005, 20–30.09.2005, 01–11.12.2005, 21–31.03.2006, 17–27.06.2006, 06–16.09.2006, 18–28.12.2006, 14–24.03.2007, 04–14.06.2007, 08–18.09.2007, 01–11.12.2007, 17–27.03.2008, 03–13.06.2008, 21–30.09.2008.	15 мин
Миллстоун-Хилл	42.6° N; 71.5° E	20–30.03.2005, 04–14.06.2006, 06–16.09.2006, 18–28.12.2006, 01–31.12.2008.	5 мин
о. Уоллопс	37.9° N; 75.5° E	20–30.03.2005, 01–11.06.2005, 20–30.09.2005, 01–11.12.2005, 21–31.03.2006, 17–27.06.2006, 06–16.09.2006, 18–28.12.2006, 14–24.03.2007, 17–22.06.2007, 08–18.09.2007, 01–11.12.2007.	15 мин
Пуэрто-Рико	18.5° N 67.1° E	20–30.09.2005	15 мин
Дайес	32.4° N; 99.8° E	20–30.09.2005	15 мин
Эглин	30.4° N; –86.8° E	20–30.09.2005	15 мин
Прухонис	50.0° N; 14.6° E	20–30.03.2005, 01–11.06.2005, 20–30.09.2005, 01–11.12.2005, 21–31.03.2006, 17–27.06.2006, 06–16.09.2006, 18–28.12.2006, 14–24.03.2007, 04–14.06.2007, 08–18.09.2007, 01–02.12.2007, 17–27.03.2008, 03–13.06.2008, 22–30.09.2008.	15 мин
УАС	65.3° S; –4.3° E	20–30.03.2005, 01–11.06.2005, 20–30.09.2005, 01–11.12.2005, 21–31.03.2006, 17–27.06.2006, 07–16.09.2006, 18–28.12.2006, 14–24.03.2007, 04–14.06.2007, 08–18.09.2007, 01–10.12.2007.	60 мин

сором Бодо Райнишем (Bodo W. Reinisch). Суточные вариации  $f_oF2$  усреднялись за те же периоды, в которые проводилось усреднение суточного хода ПЭС.

### 3. Суточные вариации вертикального ПЭС в экваториальных широтах

На рис. 2 показаны усредненные суточные вариации ПЭС, рассчитанные по картам GIM в экваториальном поясе Северного (слева) и Южного (справа) полушарий. Рисунок отражает суточный ход ПЭС для четырех сезонов года. Последовательность панелей справа выбрана таким образом, чтобы лето в Северном полушарии соответствовало лету в Южном и т. д. Толстыми линиями с маркерами показаны вариации ПЭС на трех долготах:  $-75^\circ$  E,  $15^\circ$  E,  $115^\circ$  E. Вертикальными отрезками отмечено среднеквадратическое отклонение (СКО).

В экваториальных широтах изменения ПЭС в течение суток наиболее значительны. Как в Северном, так и в Южном полушариях средняя амплитуда суточных вариаций ПЭС составляет 25 TECU. Амплитуда меняется в течение года: наибольшие значения (30–35 TECU) наблюдаются в марте (в Северном и Южном полушариях), наименьшие (15–20 TECU) – зимой (в декабре для Северного полушария и в июне – для Южного). Можно отметить «несимметричность» поведения ПЭС в Северном и Южном полушариях в периоды равноденствия: осенью (рис. 2, б, е) амплитуда суточных вариаций выше в Южном полушарии,

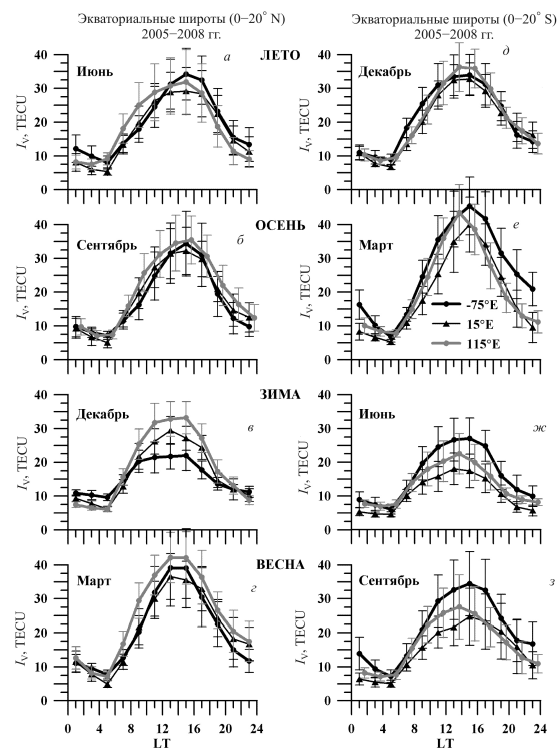


Рис. 2. Усредненные суточные вариации ПЭС, рассчитанные по картам GIM, в экваториальном поясе Северного (слева) и Южного (справа) полушарий для четырех сезонов года. Толстыми линиями с маркерами показаны вариации ПЭС на трех долготах:  $-75^\circ$  E,  $15^\circ$  E,  $115^\circ$  E. Вертикальными отрезками отмечено СКО.

весной (рис. 2, з, э) – в Северном. Величина суточного максимума ПЭС колеблется от 20–25 TECU зимой до 35–42 TECU в периоды равноденствия. Максимум значений ПЭС смещен относительно полудня и приходится приблизительно на 14 часов местного времени (LT). Минимум ПЭС (5–7 TECU) наблюдается около 05:00 LT независимо от сезона. В пределах СКО суточные вариации на трех долготах идентичны. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в работах [Ramo Rao, et al., 2006; Bagiya, et al., 2009; Mansilla, et al., 2005].

#### 4. Суточные вариации вертикального ПЭС в средних широтах

Усредненные суточные вариации ПЭС для средних широт приведены на рис. 3, а–г (Северное полушарие) и рис. 3, д–з (Южное полушарие). На рис. 3 используются те же обозначения, что на рис. 2.

На средних широтах Северного и Южного полушарий средняя амплитуда суточных вариаций ПЭС составляет 7–9 TECU, что в 2.5–3 раза меньше, чем для экваториальных широт. Сезонный ход выражен слабо и проявляется, главным образом, в изменении характера суточного хода в различные месяцы. Осенью, зимой и весной максимум ПЭС (~14–15 TECU) приходится на 14:00–15:00 LT. Минимум значений ПЭС (6–7 TECU) наблюдается в районе 03:00–05:00 LT местного времени. В пределах СКО суточный ход ПЭС одинаков в Северном и Южном полушариях. Долготные различия наблюдаются только в ночное время: в Северном полушарии ночные значения ПЭС выше в азиатском секторе (115° E), в Южном

полушарии – в американском (–75° E). Особый характер суточный ход ПЭС имеет летом. В Северном полушарии в суточных вариациях ПЭС отсутствует околополуденный максимум (рис. 3, а). В европейском (15° E) и азиатском (115° E) секторах около 14:00–15:00 LT в поведении ПЭС наблюдается локальный минимум. Максимум значений ПЭС на всех долготах смещен к 19:00 LT. В Южном полушарии аналогичная картина наблюдается в декабре в американском секторе (–75° E, рис. 3, д). Необычное поведение ПЭС связано с ветровым режимом в регионах и обсуждается в п. 7.

#### 5. Суточные вариации вертикального ПЭС в высоких широтах

Усредненные суточные вариации ПЭС для высоких широт показаны на рис. 4, а–г (Северное полушарие) и рис. 4, д–з (Южное полушарие). Обозначения те же, что на рис. 2.

В высоких широтах суточные изменения ПЭС выражены слабее всего: амплитуда суточных вариаций в обоих полушариях варьируется от 2 TECU (зимой и летом) до 5–6 TECU (осенью и весной), это в 5–10 раз меньше, чем в экваториальных широтах. В Северном полушарии 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 зимой и 00:04 LT в другие сезоны). Суточный максимум ПЭС весной и осенью составляет около 10 TECU и приходится на 14:00 LT. Зимой и летом максимум располагается около 13:00 LT, но выражен очень слабо. В Южном полушарии, в целом, на-

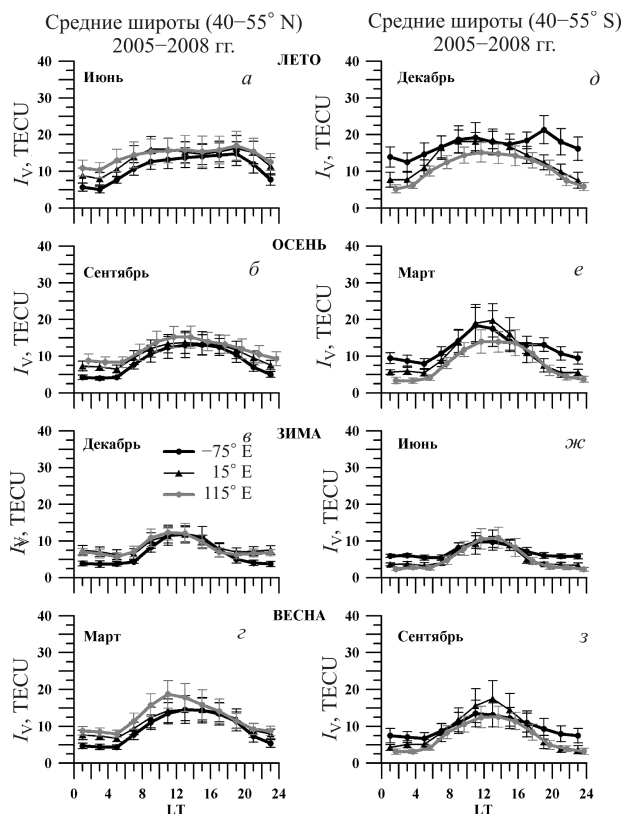


Рис. 3. Усредненные суточные вариации ПЭС, рассчитанные по картам GIM, в среднеширотном поясе Северного (слева) и Южного (справа) полушарий для четырех сезонов года. Обозначения те же, что на рис. 2.

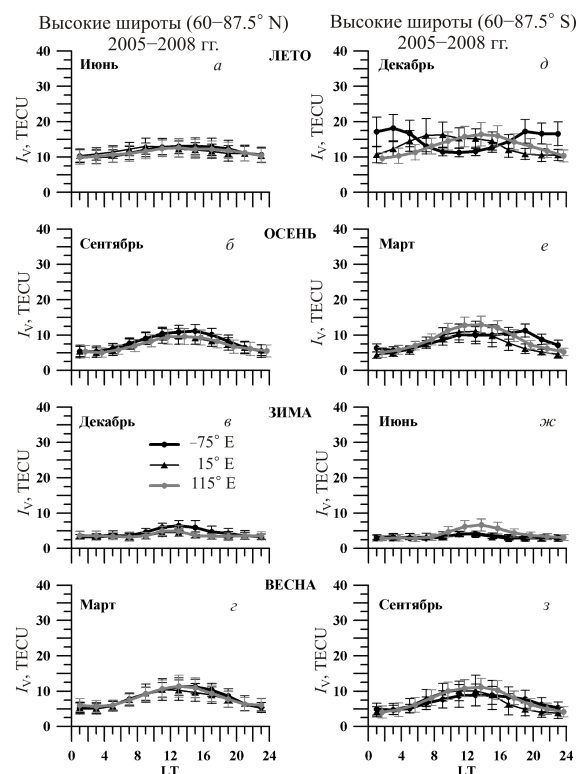


Рис. 4. Усредненные суточные вариации ПЭС, рассчитанные по картам GIM, в высокоширотном поясе Северного (слева) и Южного (справа) полушарий для четырех сезонов года. Обозначения те же, что на рис. 2.

блюдается аналогичная картина, за исключением летних (декабрь) вариаций (рис. 4, д), а также вариаций на долготе  $-75^\circ$  E в марте (рис. 4, е). Летом амплитуда суточных колебаний в Южном полушарии (рис. 4, д) выше, чем в Северном (рис. 4, а). При этом в европейском секторе ( $15^\circ$  E) Южного полушария в декабре в суточном ходе ПЭС около 11:00 LT наблюдается слабый минимум, а вариации ПЭС на долготе  $-75^\circ$  E демонстрируют аномальное поведение с хорошо выраженным минимумом в дневные часы. Суточный ход ПЭС на долготе  $-75^\circ$  E в марте (рис. 4, е) подобен тому, что наблюдается в июне на средних широтах Северного полушария (рис. 3, а): максимум значений ПЭС смещен к 19:00 LT (см. обсуждение в п. 7).

## 6. Сравнение с измерениями ПЭС по данным геостационарного ИСЗ ATS-3

Обзор [Mendillo, 2006] посвящен обобщению результатов изучения поведения ПЭС во время геомагнитных бурь с помощью низкоорбитальных и геостационарных спутников Земли в 1960–1980 гг. В обзоре приведены ежедневные суточные вариации наклонного ПЭС в течение 1971 г., полученные на станции Sagamore Hill (Сагаморе-Хилл) ( $70.8^\circ$  W;  $42.6^\circ$  N), принимавшей сигналы геостационарного ИСЗ ATS-3. Во время измерений ионосферная точка (точка пересечения луча «приемник–ATS-3» со сферой на высоте максимума ионизации) имела координаты  $38.7^\circ$  W;  $70.7^\circ$  N и высоту 420 км [Mendillo, 2006]. Используя координаты приемной станции и ионосферной точки, мы рассчитали, что угол места луча «приемник–ATS-3»  $\theta_s = 42.2^\circ$ . На рис. 5 тонкими черными линиями изображены ежедневные графики суточного хода ПЭС в марте, июне, сентябре, декабре 1971 г. по данным M. Mendillo [Mendillo, 2006]. Серыми пунктирными линиями показаны полученные нами усредненные за 2005–2008 гг. кривые хода вертикального ПЭС  $I_V$  на  $-75^\circ$  E в средних широтах. Сплошными серыми линиями представлены суточные вариации наклонного

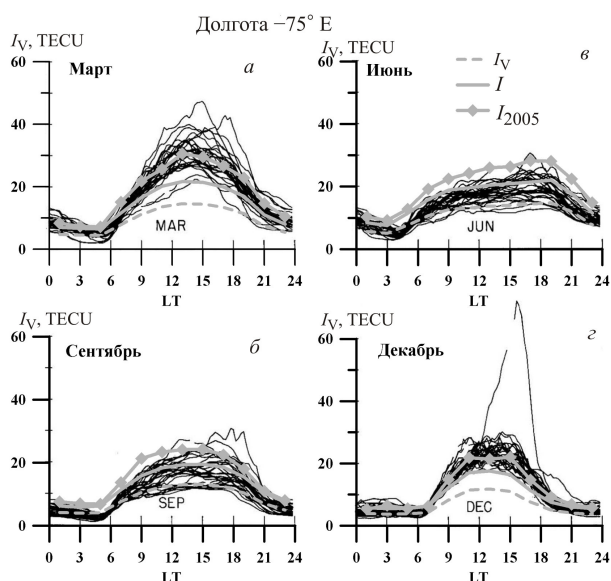


Рис. 5. Сравнение усредненных суточных вариаций ПЭС, рассчитанных по картам GIM (серые кривые), с измерениями ПЭС по данным геостационарного ИСЗ ATS-3 в 1971 г. ([Mendillo, 2006] (черные кривые)).

ПЭС  $I$ , пересчитанного из вертикального ПЭС  $I_V$  по формуле [http://umlcg.uml.edu/DIDB]:  $I = I_V / \sin \theta_s$ . Характер суточного хода ПЭС, полученный нами для средних широт американского сектора ( $-75^\circ$  E), совпадает с данными [Mendillo, 2006]. Амплитуда вариаций и величина суточного максимума вертикального ПЭС, как и следовало ожидать, несколько меньше, чем наклонного ПЭС в [Mendillo, 2006]. Рассчитанное нами наклонное ПЭС более точно соответствует данным [Mendillo, 2006]. Наилучшее соответствие наблюдается в июне и сентябре. Очевидно, что величина суточного максимума ПЭС зависит от уровня солнечной активности. Из четырех рассматривавшихся лет уровень солнечной активности в 2005 г. (среднегодовой индекс  $F10.7 = 91.7$ ) наиболее соответствует уровню 1971 г. ( $F10.7 = 106.2$ ). В остальные годы интенсивность солнечного ионизирующего излучения была существенно ниже (в 2006 г.  $F10.7 = 80.0$ , в 2007 г.  $F10.7 = 73.1$ , в 2008 г.  $F10.7 = 69.0$ ). Для сравнения построены суточные вариации наклонного ПЭС, рассчитанного в средних широтах американского сектора ( $-75^\circ$  E) отдельно для 2005 г. (серая кривая с ромбами) (рис. 5). Наилучшее соответствие среднесуточных вариаций наблюдается в марте и декабре. В июне и сентябре дневные значения ПЭС, рассчитанного по картам GIM, несколько выше, чем средний уровень дневного ПЭС по данным [Mendillo, 2006], но близок к уровню, который, согласно [Mendillo, 2006], наблюдается во время геомагнитных бурь. Следует отметить, что в июне и сентябре 2005 г. регистрировались мощные геомагнитные возмущения, что, вероятно, нашло отражение в поведении ПЭС.

## 7. Суточные вариации вертикального ПЭС и критической частоты слоя F2 ионосферы

На рис. 6, 7 сплошными линиями показаны усредненные суточные вариации вертикального ПЭС  $I_V$  в следующих долготно-широтных зонах:  $115^\circ$  E,  $40-55^\circ$  N (рис. 6, а–з);  $15^\circ$  E,  $40-55^\circ$  N (рис. 6, д–з);  $-75^\circ$  E,  $60-87.5^\circ$  S (рис. 7, а–з);  $-75^\circ$  E,  $40-55^\circ$  N (рис. 7, д–з). Панели в левой части рис. 7 расположены таким образом, чтобы лето в Южном полушарии (рис. 7, а) соответствовало лету в Северном (рис. 7, д), и т. д. На рис. 6, 7 символами (звездочки, треугольники, ромбы, квадраты) нанесены суточные вариации критической частоты  $f_0F2$  слоя, полученные по данным ионозондов, расположенных в указанных зонах (табл. 2 и рис. 1). Из рис. 6, 7 видно, что характер суточного хода ПЭС, рассчитанный по картам GIM, повторяет характер суточных вариаций критической частоты на всех рассматривавшихся долготах и различных широтных диапазонах. Это лишний раз подтверждает, что основной вклад в ПЭС вносит область ионосферы, расположенная в окрестностях главного максимума ионизации.

В суточных вариациях  $f_0F2$  наблюдаются те же особенности, которые были отмечены выше при описании суточного хода ПЭС (пункты 4, 5). Летом на средних широтах максимальные значения как ПЭС, так и  $f_0F2$  регистрируются около 19:00 LT (рис. 6, а, д; 7, д). При этом в европейском ( $15^\circ$  E) и азиатском ( $115^\circ$  E) секторах суточные вариации ПЭС и  $f_0F2$  демонстрируют небольшой минимум около



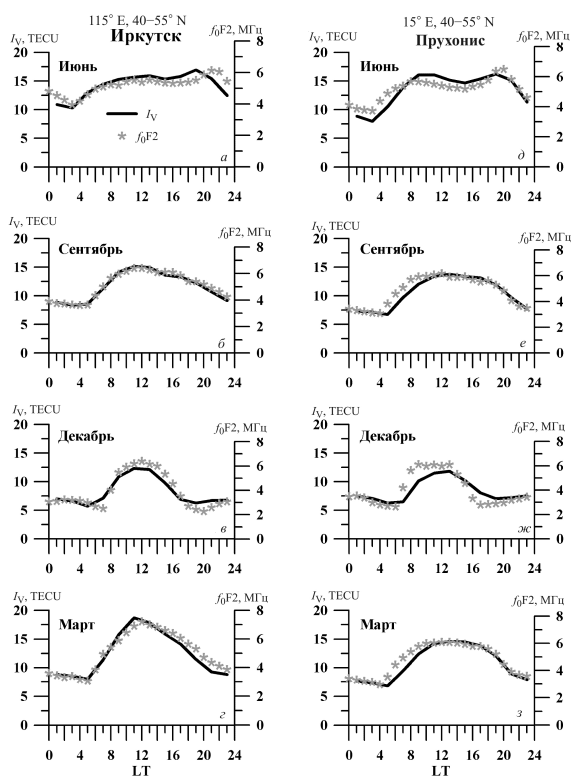


Рис. 6. Сравнение усредненных суточных вариаций вертикального ПЭС, рассчитанных по картам GIM (черные кривые), и суточного хода критической частоты слоя F2 ионосферы (звездочки) на средних широтах в восточносибирском (слева) и европейском (справа) секторах.

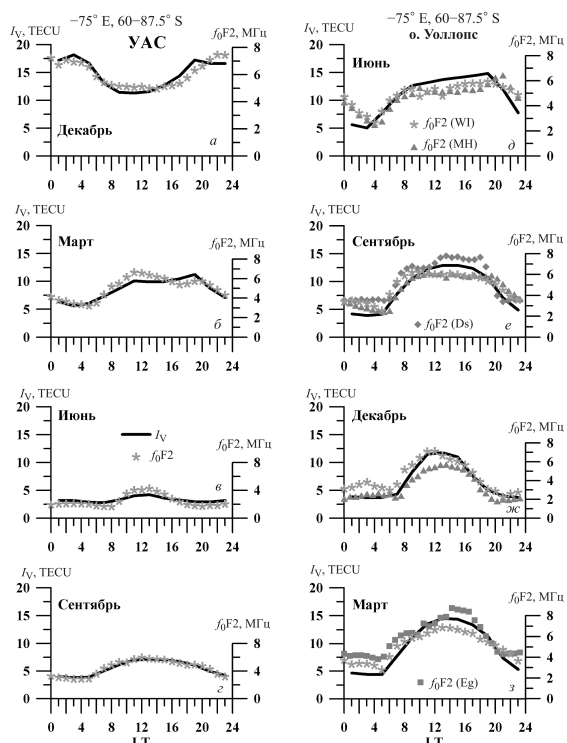


Рис. 7. Сравнение усредненных суточных вариаций вертикального ПЭС, рассчитанных по картам GIM (черные кривые), и суточного хода критической частоты слоя F2 ионосферы (маркеры) в американском секторе на высоких широтах Южного полушария (слева) и средних широтах Северного полушария (справа). Маркерами обозначены вариации  $f_0F2$  на ионосферных станциях о. Уоллопс (звездочки), Миллстоун-Хилл (треугольники), Эглин (квадраты), Дайес (ромбы).

14:00–15:00 LT. Аналогичная картина наблюдается в марте в высоких широтах Южного полушария на  $-75^\circ$  E (рис. 7, б). Аномальное поведение ПЭС с хорошо выраженным минимумом в дневные часы в декабре в том же широтно-долготном секторе соответствует поведению критической частоты (рис. 7, а). Аномальные явления (околополуденный минимум, вечерний максимум) в суточных вариациях  $f_0F2$  на средних широтах и в высоких широтах Южного полушария хорошо известны [Афраймович, Перевалова, 2006; Kohl, King, et al., 1967; Ветер в ионосфере, 1969]. Теоретические расчеты и моделирование [Афраймович, Перевалова, 2006; Kohl, King, et al., 1967] показали, что наблюдаемые эффекты являются следствием системы атмосферных ветров. Система ветров индуцирует вертикальный ионосферный дрейф, который в период 09:00–18:00 LT направлен вниз и является причиной дневного спада критической частоты слоя F2 в обсуждаемых регионах. В вечерние и ночные часы образуемый той же системой ветров вертикальный дрейф направлен вверх, что приводит к росту  $f_0F2$ .

Таким образом, в спокойных геомагнитных условиях карты GIM, несмотря на используемые в них усреднение и интерполяцию, достаточно хорошо описывают изменения ПЭС как в течение суток, так и в течение года.

## 8. Связь амплитуды суточных вариаций вертикального ПЭС с уровнем солнечной активности

Нами была проанализирована связь величины суточного максимума и амплитуды вариаций вертикального ПЭС с уровнем солнечной активности. Для этого были построены графики изменения максимума и амплитуды вариаций с 2005 по 2008 г. В качестве примера на рис. 8 для  $-75^\circ$  E Северного полушария показано поведение величины суточного максимума (рис. 8, а–з) и амплитуды суточных вариаций (рис. 8, д–з) вертикального ПЭС в период 2005–2008 гг. в марте, июне, сентябре и декабре. Линии с маркерами отображают указанные величины для трех широтных поясов, серыми столбиками показаны среднемесячные значения индекса  $F10.7$  (шкала для  $F10.7$  дана справа).

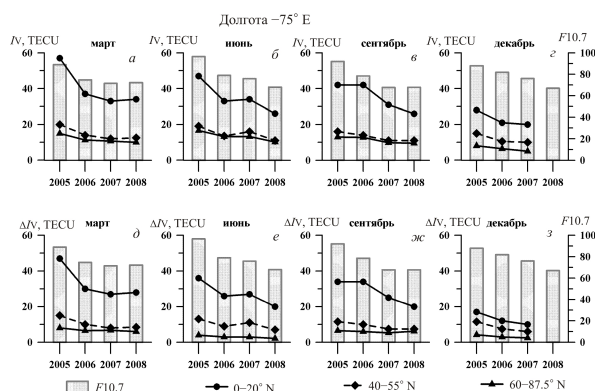


Рис. 8. Поведение величины суточного максимума (а–з) и амплитуды суточных вариаций (д–з) вертикального ПЭС в период 2005–2008 гг. в марте, июне, сентябре и декабре на  $-75^\circ$  E в Северном полушарии. Линии с маркерами отображают ход указанных величин для трех широтных поясов:  $0-20^\circ$  N (точки),  $40-55^\circ$  N (ромбы),  $60-87.5^\circ$  N (треугольники). Серыми столбиками показаны среднемесячные значения индекса  $F10.7$ , шкала для  $F10.7$  дана справа.

С 2005 по 2008 г. в экваториальных широтах наблюдается снижение величины суточного максимума ПЭС в среднем на 20 TECU (изменение относительно уровня 2005 г. 40–45 %) в марте–июне, на 16 TECU (38 %) в сентябре и на 8 TECU (28 %) в декабре. На средних и высоких широтах соответствующие понижения максимума составляют 5–7 TECU (33–40 %) в марте–июне и 3–5 TECU (30–33 %) в сентябре–декабре. Амплитуда суточных вариаций в тот же период уменьшается в экваториальных широтах на 15–18 TECU (изменение относительно уровня 2005 г. 40–45 %) в марте–сентябре и на 7 TECU (41 %) в декабре. Снижение амплитуды суточных вариаций на средних широтах составляет в среднем 5–6 TECU (40–43 %), а на высоких широтах – около 2 TECU (40 %) во все сезоны. На других долготах наблюдается аналогичная картина. В то же время с 2005 по 2008 гг. произошло падение интенсивности потока радиоизлучения Солнца в среднем на 25 %. Таким образом, снижение уровня солнечной активности приводит к уменьшению величины суточного максимума и амплитуды вариаций ПЭС. Можно заключить также, что зависимость величины максимума и амплитуды суточных вариаций ПЭС от солнечной активности в экваториальных широтах выражена сильнее, чем в средних и высоких. Указанные эффекты находятся в полном соответствии с теорией образования ионосферы [Pirog, et al., 2001; Поляков и др., 1968].

## 9. Заключение

На основе анализа карт GIM проведено исследование характера суточного хода вертикального ПЭС в спокойных гелиогеомагнитных условиях в различные сезоны 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 05:00 LT. Исключение составляют высокие широты Южного полушария, где в американском секторе наблюдается аномальный суточный ход ПЭС, обусловленный системой атмосферных ветров. Максимум суточного хода ПЭС регистрируется в 14:00–15:00 LT. Величина максимума составляет  $38 \pm 5$  TECU в экваториальных широтах,  $14 \pm 2$  TECU на средних широтах,  $10 \pm 2$  TECU в высоких широтах. Наибольший размах (20–35 TECU) суточный ход ПЭС имеет в экваториальных широтах, наименьший (2–6 TECU) – в высоких. Наибольшая амплитуда регистрируется в марте, наименьшая – в декабре. Долготные вариации практически не наблюдаются, что может быть связано с примененным усреднением по широтам. 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 совместного российско-украинского проекта, финансируемого Российским фондом фундаментальных исследований (грант 08-02-90437-Укр) и Национальной ака-

демией наук Украины (грант 72-02-а). Авторы выражают благодарность Национальному антарктическому научному центру Украины и Массачусетскому университету, (г. Лоуэлл), Центру атмосферных исследований (США) (University of Massachusetts, Lowell, Center for Atmospheric Research (США)) за предоставленные данные вертикального зондирования ионосферы, а также Полех Н.М., Пирог О.М., Воейкову С.В. и Сопину А.А. за помощь в получении данных и полезное обсуждение.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
- Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
- Ветер в ионосфере / под ред. Казимировского Э.С., Л.: Гидрометеиздат, 1969. 224 с.
- Поляков В.М., Щепкин Л.А., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Ионосферные процессы. Новосибирск: Наука, 1968. 536 с.
- Bagiya M.S., Joshi H.P., Iyer K.N., et al. TEC variations during low solar activity period (2005–2007) near the Equatorial Ionospheric Anomaly Crest region in India // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 1047–1057.
- Huo X., Yuan Y., Ou J., et al. Diurnal variations, semianual and winter anomalies of the ionospheric TEC based on GPS data in China // *Progress in Natural Science.* 2005. V. 15, N 1. P. 56–60.
- Kouris S.S., Xenos T.D., Polimeris K.D., Strigiou D. TEC and  $f_oF_2$  variations: preliminary results // *Annals of Geophysics.* 2004. V. 47, N 4. P. 1326–1332.
- 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.
- Mendillo M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content // *Rev. Geophys.* 2006. V. 44. RG4001, doi:10.1029/2005RG000193.
- Mansilla G.A., Mosert M., Ezquer R.G. Seasonal variation of the total electron content, maximum electron density and equivalent slab thickness at a South-American station // *J. Atmos. Terr. Phys.* 2005. V. 67. P. 1687–1690.
- Mannucci A.J., Ho C.M., Lindqwister U.J. A global mapping technique for GPS-driven ionospheric TEC measurements // *Radio Science.* 1998. V. 33, N 8. P. 565–582.
- 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.
- Ramo Rao P.V.S., Krishna G.S., Niranjan K., Prasad D.S.V.V.D. Temporal and spatial variations in TEC using simultaneous measurements from the Indian GPS network of receivers during the low solar activity period of 2004–2005 // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24. P. 3279–3292.
- Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The Ionosphere Map EXchange Format Version 1 // *Proc. IGS AC Workshop.* Darmstadt. Germany. February 9–11, 1998. P. 233–247.
- Wu S., Zhang K., Yuan Y., Wu F. Spatio-temporal characteristics of the ionospheric TEC variation for GPSnet-based real-time positioning in Victoria // *Journal of Global Positioning Systems.* 2006. V. 5, N 1–2. P. 52–57.
- <http://www.jpl.nasa.gov>  
<http://www.cx.unibe.ch>  
<ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex>  
<http://clust1.wdcb.ru/spidr/index.jsp>  
<http://umlcar.uml.edu/DIDB>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

<sup>2</sup>Радиоастрономический институт НАН Украины, Харьков