

9. СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ВОСТОЧНОСИБИРСКОМ РЕГИОНЕ В АВГУСТЕ 2009 Г.

А. С. Полякова, Н.П. Перевалова

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В рамках комплексных исследований геофизической обстановки в Байкальской рифтовой зоне, проводимых ИСЗФ СО РАН, ИЗК СО РАН и ОФП БНЦ СО РАН проведено исследование характера суточных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в восточносибирском регионе в августе 2009 г. на основе карт GIM (Global Ionospheric Maps). Выполнен анализ суточных вариаций ПЭС, характерных для данного региона в различные сезоны года в спокойных гелио-геомагнитных условиях. Характерные вариации ПЭС отражают фоновое поведение ионизации. Показано, что суточный ход ПЭС, усредненный в августе 2009 г., отличается от характерного. Установлено, что в исследуемый период наибольшие отклонения текущих значений ПЭС от усредненных регистрируются во время геомагнитных возмущений, при этом величина ПЭС имеет аномально низкие значения в дневные часы. Показано, что характер усредненного суточного хода ПЭС повторяет характер суточных вариаций критической частоты ионосферного слоя F2.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших характеристик ионосферы является полное электронное содержание (ПЭС), которое представляет собой количество электронов в столбе единичного сечения вдоль некоторого луча. Вариации ПЭС отражают поведение локальной электронной концентрации в ионосфере и могут служить индикатором состояния ионосферной плазмы. Использование ПЭС для диагностики и прогнозирования состояния ионосферы требует, в первую очередь, изучения морфологии поведения ПЭС в спокойных гелио- геомагнитных условиях.

ПЭС можно определять по характеристикам транзиосферных радиосигналов, т.к. ионосферная задержка радиосигнала пропорциональна ПЭС. В последнее десятилетие большую популярность получили изучения ПЭС по данным фазовых измерений двухчастотных приемников GPS. Развитие сетей наземных приемников GPS и разработка технологии GIM (Global Ionospheric Maps) построения глобальных карт абсолютного "вертикального" ПЭС позволяет получить общую картину распределения ионизации в заданном регионе и проследить ее динамику.

Исследование характера суточного хода "вертикального" ПЭС в спокойных гелио-геомагнитных условиях в различных широтно-долготных секторах по данным GIM выполнено в работе [1]. Установлено, что величина ночного минимума ПЭС составляет 5-7 TECU независимо от сезона, широты и долготы местности. Суточный

максимум ПЭС регистрируется в 14-15 LT. Величина суточного максимума различна в различных широтных поясах: 38 ± 5 TECU в экваториальных широтах, 14 ± 2 TECU на средних широтах, 10 ± 2 TECU в высоких широтах. Наибольший размах суточный ход ПЭС имеет в экваториальных широтах, наименьший – в высоких. В средних широтах амплитуда суточных вариаций (разница между максимальным и минимальным значением ПЭС в течение суток) составляет 7-9 TECU. Максимальное значение амплитуды регистрируется в марте, минимальное – в декабре.

В настоящей работе представлены результаты исследования суточных вариаций абсолютного "вертикального" ПЭС в восточносибирском регионе в августе 2009 г., выполненного на основе анализа карт GIM. Для краткости изложения в работе под "ПЭС" имеется в виду "абсолютное вертикальное ПЭС".

МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Исследование суточных вариаций ПЭС проводилось с помощью глобальных карт GIM. Построение карт GIM осуществляется путем интерполяции данных мировой сети приемников GPS [2, 3]. Для хранения и передачи карт GIM в цифровом виде разработан стандартный формат IONEX. Каждый файл IONEX содержит глобальные карты вертикального ПЭС (I_V), за одни сутки по шкале мирового времени UT с временным разрешением 2 часа. Пространственный диапазон карт: от -180° до 180° по долготе и от -87.5° до 87.5° по широте. Пространственное разрешение карт задается шагом по долготе (5°) и шагом по широте (2.5°). В настоящей работе использовались карты JPLG, рассчитанные в Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology (JPLG, <http://www.jpl.nasa.gov>). 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 синего цвета показано распределение ПЭС в 13:00 LT 13 августа 2009 г. в прибайкальском регионе.

Для описания характерного поведения суточных вариаций ПЭС в Восточной Сибири в спокойных гелио- геомагнитных условиях для различных сезонов года были получены усредненные суточные вариации (I_q) в узле GIM (105°E , 52.5°N), наиболее близком к Иркутску. С этой целью были выбраны данные за 4 года с низкой солнечной активностью (2005-2008). Поток радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см (F10.7) изменялся в эти годы от 140 до 65 (в ед. $1022 \text{ Вт}/(\text{Гц}\cdot\text{м}^2)$), соответственно. Исследовались вариации ПЭС для месяцев, соответствующих различным сезонным условиям: равноденствие (март, сентябрь) и солнцестояние (июнь, декабрь), а также

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

для августа 2009 г. В каждом указанном месяце выбирались данные за десять дней с наиболее спокойной геомагнитной обстановкой. Спокойными считались условия, когда значение индекса K_p не превышали 3, а индекс Dst не опускался ниже -50 нТл. Данные о поведении индексов $F10.7$, Dst , K_p получены на сайтах <http://clust1.wdcb.ru/spidr/index.jsp>, <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/> и <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>. Суточный ход ПЭС усреднялся отдельно для всех указанных периодов. Таким образом, в результате обработки данных были получены усредненные суточные вариации ПЭС (I_q), характеризующие поведение ПЭС в регионе в спокойных гелио- геомагнитных условиях в различные сезоны.

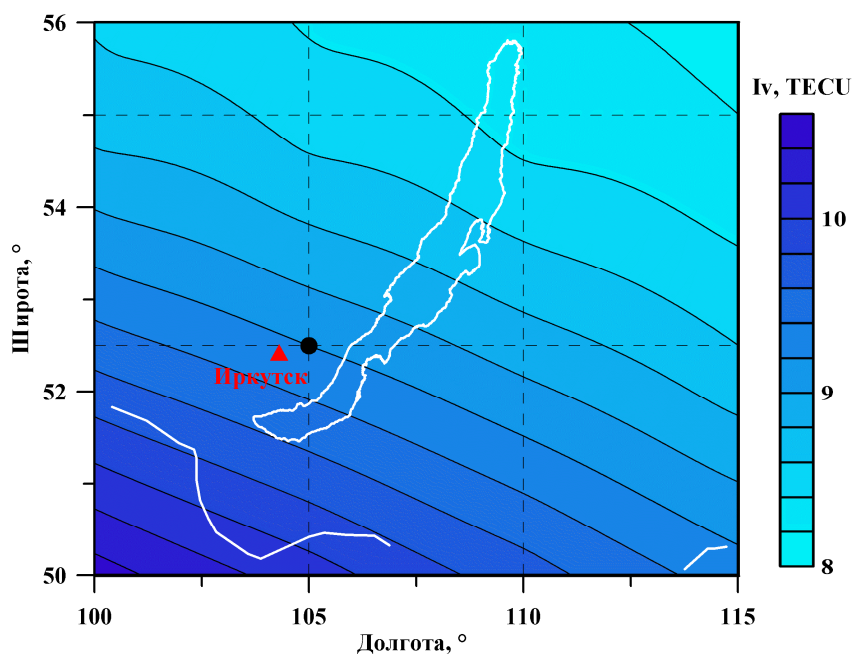


Рис. 1. Распределение ПЭС (I_V) по данным GIM в восточносибирском регионе в 13:00 LT 13 августа 2009 г. Треугольником отмечено положение ионосферной станции Иркутск. Пунктирными линиями нанесена координатная сетка, в узлах которой задаются значения I_V в файлах IONEX. Точкой отмечен узел GIM, в котором рассчитывался суточный ход ПЭС.

Для августа 2009 г. кроме суточного хода I_q , усредненного для спокойных условий 2005-2008 гг., определен также среднемесячный суточный ход I_{2009} , путем усреднения суточных вариаций за все дни исследуемого месяца. Проведено сравнение поведения ПЭС в августе 2009 г. (I_{2009}) с суточным ходом ПЭС в спокойных условиях (I_q). Проанализированы отклонения ($dI_V = I_V - I_q$) текущих величин ПЭС в августе 2009 г. от усредненных значений I_q .

Поведение ПЭС сравнивалось с суточными вариациями критической частоты f_0F2 ионосферного слоя F2, которая является функцией электронной концентрации в максимуме ионизации. С этой целью использовались данные вертикального

зондирования, полученные на Иркутском ионозонде в августе 2009 г. Суточные вариации f^oF2 усреднялись за те же периоды, за которые проводилось усреднение суточного хода ПЭС.

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ПЭС В РЕГИОНЕ В РАЗЛИЧНЫЕ СЕЗОНЫ

На Рис. 2 показаны усредненные суточные вариации ПЭС в восточносибирском регионе, рассчитанные по картам GIM, для четырех сезонов года. Вертикальными отрезками показано среднеквадратическое отклонение (СКО).

Средняя амплитуда суточных вариаций ПЭС в регионе составляет около 7 TECU. Амплитуда меняется в течение года: наибольшие значения (около 10 TECU) наблюдаются в марте, наименьшие (около 6 TECU) - в условиях солнцестояния (июнь и декабрь). В условиях равноденствия наблюдается асимметрия в поведении ПЭС: весной амплитуда суточных вариаций почти в 1.5 раза больше, чем осенью. Значение суточного минимума ПЭС также колеблется в зависимости от сезона: от 5 TECU зимой до 9 TECU летом. В условиях равноденствия минимум в суточном ходе ПЭС регистрируется около 05 LT, летом – в 03 LT, а зимой – в 07 LT. Максимум значений ПЭС в марте, сентябре и декабре наблюдается около полудня (11-13 LT). Величина суточного максимума ПЭС весной, летом и осенью составляет 15-16 TECU, зимой – 10 TECU. Указанные свойства суточного хода ПЭС на средних широтах находятся в соответствии с результатами, представленными в работе [1].

Рис. 2 показывает, что величина СКО для усредненного суточного хода ПЭС тоже варьируется в течение суток: наибольшие значения (3-5 TECU) имеет днем, наименьшие (1-2 TECU) – в течение ночи и практически не зависит от сезона. Shim et al. [4] исследовали изменчивость ПЭС от дня ко дню с помощью данных сети наземных GPS приемников и показали, что на средних широтах стандартное отклонение для ПЭС имеет значение около 5 TECU в течение дня и 2-3 TECU ночью в июне и в равноденствия; а в период декабрьского солнцестояния стандартное отклонение увеличивается до 7-8 TECU. Однако, авторы [4] полагают, что это увеличение СКО, которое не наблюдается в полученных нами отклонениях, возможно, было связано с возмущениями геомагнитной обстановки, регистрировавшихся в период, использованный в работе [4], для описания поведения ПЭС в условиях декабрьского солнцестояния.

Следует отметить особый характер в поведении ПЭС в июне (Рис. 2б). Максимум в суточных вариациях смещен относительно полудня к 20 LT, а в районе 16

LT наблюдается слабый локальный минимум. Необычное поведение ПЭС связано с ветровым режимом в регионе и обсуждается в п. 5.

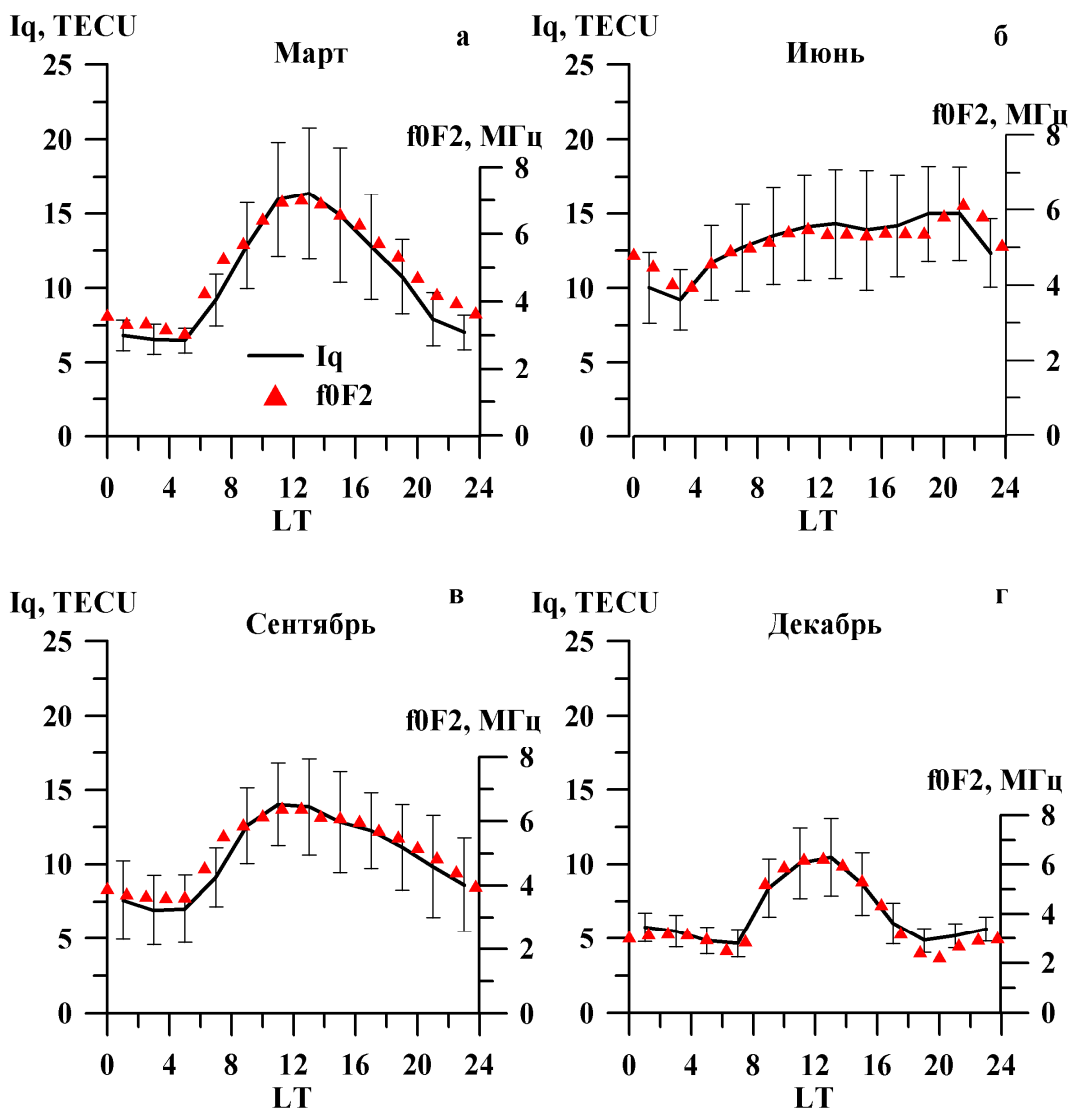


Рис. 2. Усредненные в спокойные дни 2005-2008 гг. суточные вариации ПЭС (I_q) в восточносибирском регионе, рассчитанные по данным GIM. Вертикальными отрезками показано СКО. Красными треугольниками отображен суточный ход критической частоты слоя F2 ионосферы, усредненный за те же периоды, что и вариации ПЭС.

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ПЭС В АВГУСТЕ

На Рис. 3а приведены рассчитанные по данным GIM усредненные за четыре года в спокойные дни августа суточные вариации ПЭС (I_q) для восточносибирского региона (черная линия). Вертикальными отрезками показано СКО.

Характерное значение амплитуды суточных вариаций ПЭС в спокойных условиях в августе составляет около 7.5 TECU, величина суточного максимума достигает 12 TECU и регистрируется в 13 LT. Суточный минимум (~5 TECU)

наблюдается в 03 LT. В целом, специфический для августа суточный ход ПЭС похож на суточный ход, наблюдаемый в сентябре (Рис. 2в).

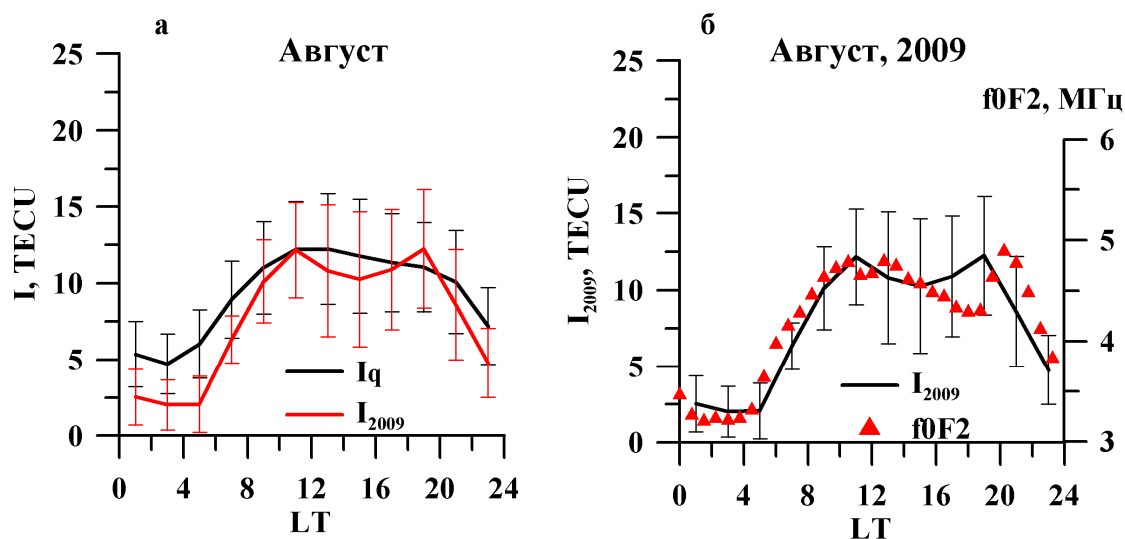


Рис. 3. Суточные вариации ПЭС в восточносибирском регионе, усредненные для спокойных дней августа 2005-2008 гг. (а, черная линия) и для августа 2009 г. (а, красная линия). Суточный ход ПЭС, усредненный в августе 2009 г. (I_{2009}) (б, черная линия). Треугольниками нанесены суточные вариации критической частоты ионосферного слоя F2, усредненные за все дни августа 2009 г. Вертикальными отрезками показано СКО суточных вариаций ПЭС.

Красной линией на Рис. 3а представлен суточный ход ПЭС (I_{2009}), полученный путем усреднения данных за все дни августа 2009 г. Вертикальными отрезками показано СКО.

Среднемесячные суточные вариации ПЭС в августе 2009 г. отличаются от хода ПЭС, характерного для августа в спокойных условиях (I_q). Величина суточного минимума в 2009 г. в два раза меньше характерного значения на протяжении всей ночи (с 03 до 06 LT). Кроме того, наблюдаются два локальных максимума в суточных вариациях ПЭС с величиной приблизительно 12 TECU, в 11 и 19 LT; а в дневные часы (14-15 LT) вариации ПЭС демонстрируют хорошо выраженный локальный минимум.

Вероятно, низкие значения ПЭС около полудня в 2009 г. могут быть связаны с тем, что для расчета среднемесячных вариаций ПЭС в 2009 г. усреднение проводилось для всех дней месяца, в течение которого наблюдались слабые геомагнитные возмущения, которые приводили к аномально низким значениям ПЭС в дневные часы, что будет показано ниже. Кроме того, особый ход ПЭС с наличием двух локальных максимумов, наблюдаемых в утренние и вечерние часы, и минимумом в дневное

время, может быть вызван особенностями ветрового режима в регионе, обсуждаемыми в п. 5.

СУТОЧНЫЕ ВАРИАЦИИ ПЭС И КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ СЛОЯ F2 В АВГУСТЕ 2009 Г

Красными треугольниками на Рис. 2 представлены распределения усредненного суточного хода критической частоты ионосферного слоя F2, полученные по данным иркутского ионозонда. На Рис. 3б сплошной линией показаны усредненные за август 2009 г. вариации ПЭС (I_{2009}), треугольниками нанесены усредненные суточные вариации критической частоты f_0F2 над Иркутском. Усреднение суточных вариаций f_0F2 проводилось за те же периоды, что и усреднение вариаций ПЭС.

Из Рис. 2 и 3б видно, что характер суточного хода ПЭС, определенный с помощью данных GIM, повторяет суточный ход f_0F2 . В суточных вариациях критической частоты наблюдаются те же особенности, что и для вариаций ПЭС. В июне суточный максимум f_0F2 регистрируется в вечернее время; в августе 2009 г. в ходе критической частоты имеются два локальных максимума, наблюдаемые в 10 и 20 LT, и локальный минимум, который регистрируется несколько позже, чем для ПЭС - около 18 LT. Это лишний раз подтверждает, что основной вклад в ПЭС вносит область ионосферы, расположенная в окрестностях главного максимума ионизации.

Аномальные явления (околополуденный минимум, вечерний максимум) в суточных вариациях f_0F2 на средних широтах хорошо известны [5-7]. Теоретические расчеты [5-7] и моделирование [5,6] показали, что наблюдаемые эффекты являются следствием системы атмосферных ветров. Градиенты давления нейтрального газа на высоте F слоя вызывают интенсивные атмосферные ветры. Система ветров индуцирует вертикальный ионосферный дрейф, который в период 09-18 ч местного времени направлен вниз и является причиной дневного спада критической частоты слоя F2 в обсуждаемом регионе. В вечерние и ночные часы образуемый той же системой ветров вертикальный дрейф направлен вверх, что приводит к росту f_0F2 .

ОТКЛОНЕНИЯ ПЭС ОТ ХАРАКТЕРНОГО ЗНАЧЕНИЯ В АВГУСТЕ 2009 Г

На Рис 4а. приведено распределение индексов геомагнитной активности Dst (черная линия) и Kp (зеленая линия) в исследуемом месяце. Отклонения ПЭС (dI_V) от их среднего суточного хода в спокойных условиях показаны на Рис. 4б. Можно выделить несколько периодов слабых возмущений геомагнитной обстановки в

исследуемом месяце (Рис 4а). Наиболее сильные возмущения (индекс Кр превышал 4, а Dst опускался ниже -40 нТл) регистрировались 6-7 августа и 30-31 августа. Слабые возмущения наблюдались также 19-20 августа. Но в основном, геомагнитная обстановка в августе 2009 г. была спокойной.

Даже в этот спокойный период в распределении отклонений ПЭС (dI_V) наблюдаются постоянные флуктуации (Рис. 4б), отражающие изменчивость ПЭС от дня ко дню. В отклонениях ПЭС хорошо прослеживается суточный ход: наименьшие значения (0-2 TECU) регистрируются, как правило, в вечерние и ночные часы, наибольшие (до 12 TECU, в среднем 4-5 TECU) – в течение дня. Следовательно, изменчивость ПЭС нарастает при переходе от ночи ко дню.

Отклонения ПЭС в августе 2009 г. отрицательны для большинства времени суток и всегда меньше нуля в ночные часы. Это говорит о том, что значения ПЭС в 2009 г. были меньше величин, характерных для августа в спокойных условиях. Такой эффект, возможно, связан с тем, что при расчете значений ПЭС, свойственных августу в спокойных условиях, усреднялись данные за годы с большей солнечной активностью (среднегодовой индекс $F_{10.7}=91.7$ в 2005, $F_{10.7}=80.0$ в 2006), чем в 2009 году ($F_{10.7}=70.55$). А величина суточного максимума ПЭС, амплитуда суточных вариаций и среднее значение ПЭС находятся в прямой зависимости от солнечной активности [1, 8].

Из Рис. 4 видно, что самые большие отклонения ПЭС регистрируются в периоды, связанные с возмущенной геофизической обстановкой: 6-7 и 20-21 августа. При этом наблюдаются аномально низкие значения ПЭС в околополуденные часы с отклонением до 8-10 TECU (Рис 4б).

В распределении отклонений ПЭС (dI_V) в августе 2009 г. можно выделить два типа суточного хода (Рис. 4б). Для большинства дней месяца отклонения ПЭС имеют два положительных максимума в утренние и вечерние часы и один положительный минимум около полудня. Повышенные относительно характерных для спокойных условий величин значения ПЭС регистрировались в 11 и 19-20 LT. Среднее отклонение ПЭС днем (~15 LT) составляло около -5 TECU. Такое поведение ПЭС нашло отражение в усредненном суточном ходе ПЭС в августе 2009 г. (I_{2009}) с локальным минимумом около 15 LT и двумя максимумами, смещенными симметрично примерно на 4 часа от времени локального минимума (Рис. 3), и, вероятно, связано с особенностями системы атмосферных ветров, что обсуждалось выше. С другой стороны, 13-15, 18-19, 23-25, 27 и 29 августа в суточном ходе отклонений ПЭС

наблюдается отчетливо выраженный положительный полуденный максимум. Следовательно, для этих дней значения ПЭС в дневные часы были повышенными относительно характерного для спокойных условий уровня. Подобная неустойчивость в поведении ПЭС свидетельствует о том, что в августе происходят процессы перестройки ионосферы от летних условий к осенним.

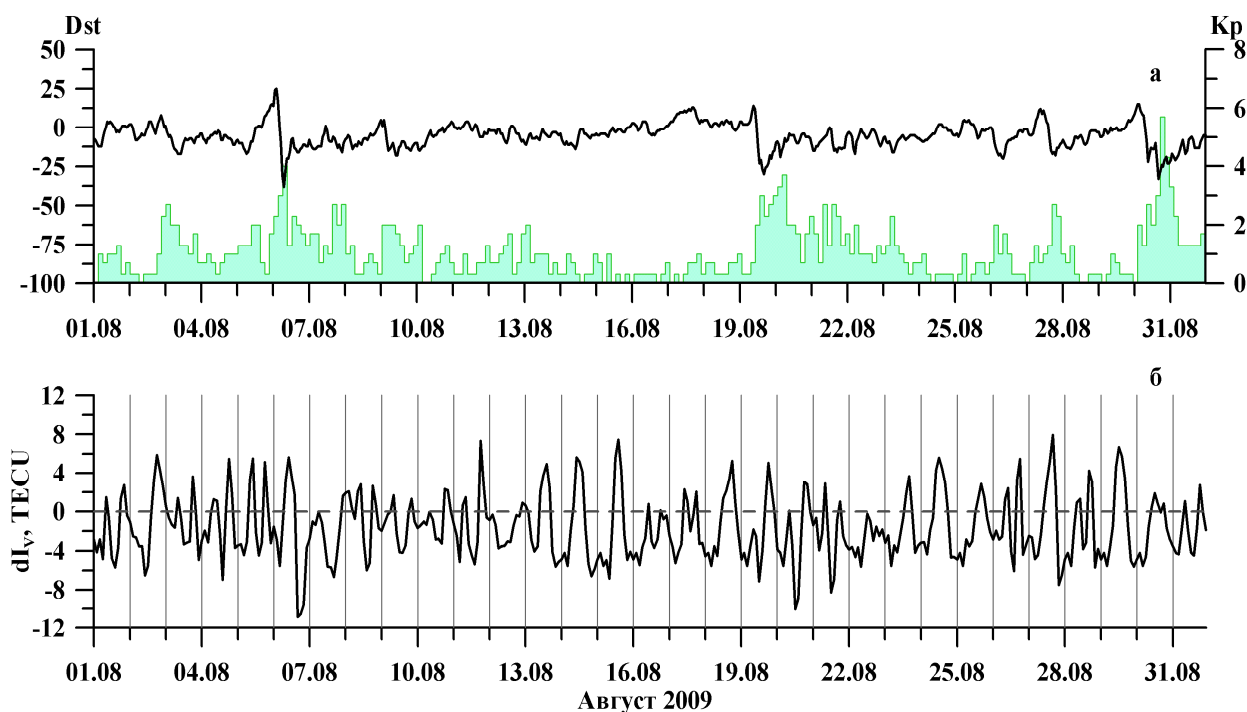


Рис. 4. Значения индексов Dst (а, черная линия) и Kp (а, зеленая линия). Отклонения текущих величин ПЭС (dIf), от характерных для августа в спокойных условиях значений, серая пунктирная линия показывает нулевое значение отклонений (б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках комплексных исследований геофизической обстановки в Байкальской рифтовой зоне, проводимых ИСЗФ СО РАН, ИЗК СО РАН и ОФП БНЦ СО РАН выполнено исследование характера суточных вариаций полного электронного содержания (ПЭС) в восточносибирском регионе в августе 2009 г. на основе карт GIM (Global Ionospheric Maps).

Установлено, что амплитуда суточных вариаций ПЭС в восточносибирском регионе в среднем составляет 7 TECU и меняется в течение года: наибольшее значение (10 TECU) наблюдается в равноденствие, наименьшее (6 TECU) – в декабре.

В августе амплитуда суточных вариаций над Иркутском составляет около 7.5 TECU, величина суточного максимума достигает 12 TECU и регистрируется в 13 LT. Минимального значения (~5 TECU) ПЭС достигает в 03 LT.

Показано, что даже в спокойных геомагнитных условиях существуют постоянные флуктуации ПЭС относительно усредненного значения, причем эти флуктуации нарастают при переходе от ночных часов к дневным.

В августе 2009 г. среднемесячный ход ПЭС имеет отличия от характерного для спокойных условий: наблюдаются два локальных максимума в распределении ПЭС в 11 и 19 LT, а также хорошо выраженный минимум в послеполуденные часы. Аномальные явления в ходе ПЭС, вероятно, могут быть обусловлены системами атмосферных ветров и эффектами геомагнитных возмущений.

Обнаружено, что наибольшие отклонения ПЭС от характерных для этого времени года значений наблюдаются во время геомагнитных возмущений, причем величина ПЭС имеет аномально низкие значения в дневные часы.

Характер суточного хода ПЭС, определенный с помощью данных GIM, повторяет суточный ход f_0F2 . Сравнение усредненных суточных вариаций с поведением критической частоты ионосферного слоя F2 подтвердило, что основной вклад в ПЭС вносит область ионосферы, расположенная в окрестностях главного максимума ионизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перевалова Н.П., Полякова А.С., Зализовский А.В. Суточные вариации "вертикального" полного электронного содержания в спокойных геомагнитных условиях // Солнечно-земная физика, 2009, вып. 14, с. 82-88.
2. 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.
3. 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.
4. Shim J.S., Scherliess L., Schunk R.W., Thompson D.C. Spatial correlations of day-to-day ionosphere total electron content variability obtained from ground-based GPS // J. Geophys. Res., 2008, V. 113, A09309, doi:10.1029/2007JA012635.
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 /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.
8. Liu, L and Chen Y. Statistical analysis of solar activity variations of total electron content at Jet Propulsion Laboratory from GPS observations // J. Geophys. Res., 2009, V. 114, A10311, doi:10.1029/2009JA014533.