



УДК 550.388.2

И. А. Носиков, М. В. Клименко, В. В. Клименко, В. Трухлик**ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ
В СИСТЕМЕ ИОНОСФЕРА-ПЛАЗМОСФЕРА
НАД ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ СТАНЦИЕЙ «ЯКАМАРКА»
В КОНЦЕ СЕНТЯБРЯ 2011 ГОДА**

Представлен анализ данных измерений ионосферных параметров ионозондом и радаром некогерентного рассеяния (РНР) в Якамарке (Перу) в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь 22–29 сентября 2011 г. По данным РНР оценен вклад ионосферы в полное электронное содержание (ТЕС). Данные наблюдений сравниваются с результатами расчетов в модели GSM ТИП. Выделены особенности поведения электронной концентрации N_e в экваториальной ионосфере и, в частности, рассмотрено поведение F3 слоя. Сравнение результатов модельных расчетов и данных наблюдений в спокойных условиях и во время геомагнитной бури выявило удовлетворительное согласие.

61

We present the analysis of the ionosonde and incoherent scatter radar (ISR) data of ionospheric parameters over Jicamarca (Peru) in quiet conditions and during geomagnetic storms on 22–29 September 2011. According to ISR data the estimation of the ionospheric contribution to the Total Electron Content (TEC) was carried out. These observation data are compared with GSM TIP model calculation results. The features of the electron density N_e behavior in the equatorial ionosphere and, in particular, F3 layer behavior, were identified. The agreement of the model calculation results and observation data analysis was obtained in quiet conditions and during geomagnetic storms.

Ключевые слова: F3-слой, экваториальная аномалия, геомагнитная буря, некогерентное рассеяние, ионозонд, модель, GPS TEC.

Key word: F3 layer, equatorial anomaly, geomagnetic storm, incoherent scatter, ionosonde, model, GPS TEC.

Несмотря на продолжительные исследования экваториальной ионосферы, до сих пор остаются нерешенными многие вопросы, связанные с физикой этой области околоземного космического пространства. При этом некоторые особенности трехмерного распределения электронной концентрации в экваториальной ионосфере описаны не в полной мере. Наиболее известными крупномасштабными особенностями пространственной структуры электронной концентрации в этой области являются экваториальная аномалия [1] и F3-слой [1; 2]. GPS позиционирование с помощью одночастотных приемников сигналов и измерения вертикального GPS TEC именно в низкоширотной ионосфере имеют большую погрешность по сравнению со средними широтами из-за наличия описанных выше широтно-долготных и высотных градиентов электронной концентрации. Для уменьшения и устранения в дальнейшем погрешности измерений GPS TEC необходимо знание распределения ионосферного и плазмосферного электронного содержания в этой области. Данная работа по-



священа исследованию вертикальной структуры системы экваториальная ионосфера-плазмосфера с использованием различных методов. Анализ данных измерений ионозондом и радаром некогерентного рассеяния (РНР) в Якамарке (Перу), а также результаты расчетов Глобальной самосогласованной модели термосфера, ионосфера, протоносфера (ГСМ ТИП) [3] позволили описать поведение экваториальной ионосферы в спокойных условиях и во время геомагнитных бурь в период 22–29 сентября 2011 г.

На рисунке 1 показаны вариации индексов геомагнитной активности Dst и Kp в конце сентября 2011 г. В этот период наблюдалась геомагнитная буря с внезапным началом в 12:35 UT 26 сентября 2011 г. Быстрое понижение Dst -индекса (~ 60 нТл/ч между 15:00 UT и 16:00 UT 26 сентября) произошло в главную фазу бури. При этом Dst -индекс достиг своего минимального значения -103 нТл в 24:00 UT 26 сентября. В момент внезапного начала бури (26 сентября) Kp индекс выявил рост и сохранял высокие значения за период 26–29 сентября 2011 г. Следующая геомагнитная буря также была с внезапным началом (21:00 UT 27 сентября) и минимальное значение Dst -60 нТл было достигнуто в 08:00 UT 28 сентября 2011 г.

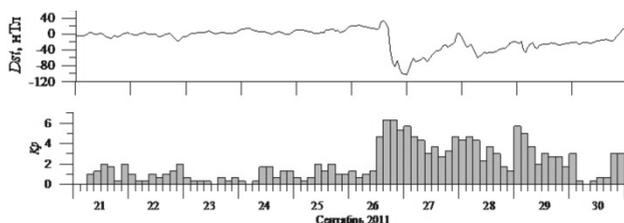


Рис. 1. Поведение индексов геомагнитной активности Dst и Kp в сентябре 2011 г.

Для описания изменений вертикального профиля электронной концентрации над станцией «Якамарка» в указанный период мы воспользовались результатами расчетов, полученными в модели ГСМ ТИП. Модель основана на численном решении системы квазигидродинамических уравнений непрерывности, движения и теплового баланса для нейтральных и заряженных частиц холодной околоземной плазмы совместно с уравнением для потенциала электрического поля в интервале высот от 80 км до геоцентрического расстояния 15 радиусов Земли с учетом несовпадения географической и геомагнитной осей. Модель ГСМ ТИП рассчитывает для заданных входных параметров глобальное распределение температуры T_n , концентраций (O_2 , N_2 , O) и вектора скорости нейтральной составляющей верхней атмосферы Земли, концентраций, температуры и скоростей атомарных (O^+ , H^+) и молекулярных ионов и электронов, а также двумерное распределение потенциала электрического поля ионосферного (динамо-поле) и магнитосферного происхождения. Магнитное поле Земли аппроксимируется наклоненным диполем. В модели используется пространственная сетка с шагами 5° по широте и 15° по долготе, в которой заданы основания силовых линий геомагнитного поля на высоте 175 км. При интегрировании моделирующих уравнений используется переменный шаг по вертикали, расту-



щий с высотой. Решение системы моделирующих уравнений осуществляется конечно-разностными методами. Подробное описание модели ГСМ ТИП представлено в [3; 4]. Ранее с использованием этой модели были проведены расчеты поведения различных ионосферных параметров во время геомагнитных бурь [5; 6]. В этих работах было показано, что полученные результаты модельных расчетов корректно воспроизводят возмущения ионосферных параметров на средних и низких широтах. Таким образом, модель ГСМ ТИП может быть успешно использована в подобных исследованиях. В этих же трудах можно найти подробное описание постановки задачи моделирования ионосферных эффектов геомагнитных бурь, которой мы воспользовались и в настоящей работе.

Данные измерений и результаты модельных расчетов

Сравнение параметров максимума F -слоя (электронной концентрации N_{\max} и высоты h_{\max}), полученных по данным измерений ионозонда и результатам модельных расчетов, показано на рисунке 2. Одной из отличительных особенностей экваториальной ионосферы является наличие $F3$ -слоя. Согласно модельным расчетам $F3$ -слой появляется выше максимума $F2$ -слоя на высотах ≥ 400 км. В отдельные моменты времени этот слой может становиться главным, когда его максимум превышает максимум $F2$ -слоя, что позволяет обнаруживать его при зондировании снизу. В остальные моменты времени, когда $foF3 < foF2$, при наземном зондировании он не виден, и тогда его обнаружение становится сложной задачей, поскольку в этом случае его можно увидеть только либо при зондировании ионосферы со спутников, либо с помощью РНР, данными измерений которого мы и воспользовались в нашей работе.

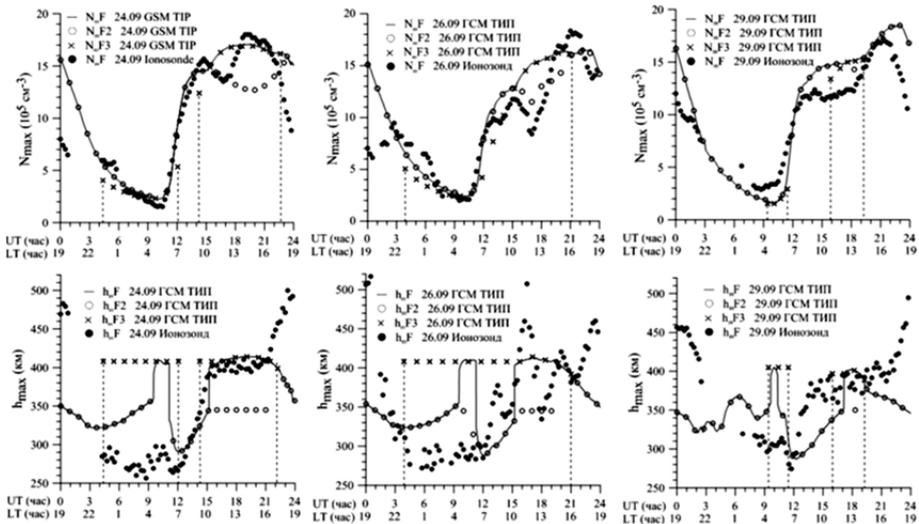


Рис. 2. Суточные вариации N_{\max} (вверху) и h_{\max} (внизу) по данным ионозонда и результатам расчетов, полученных в модели ГСМ ТИП с выделением максимумов $F2$ и $F3$ слоев и абсолютного максимума F слоя в спокойных условиях (24.09) и в главную (26.09), и восстановительную (29.09) фазы бури



Заметим, что ионозонд дает значения абсолютного максимума F -области, а в результатах модельных расчетов имеется возможность выделить суточные вариации электронной концентрации как в максимумах отдельных слоев ($F2$ и $F3$), так и в абсолютном максимуме F -области. В целом имеется достаточно хорошее согласие результатов модельных расчетов с данными наблюдений, особенно в интервале 12:00–21:00 UT, однако есть и существенные отличия, главным образом в интервалах 21:00–02:00 UT и 04:00–12:00 UT. На первом из этих интервалов данные наблюдений свидетельствуют о наличии $F3$ -слоя, который отсутствует в модельных расчетах. Это связано с тем, что в последних не учитывается электрическое поле динамо F -области, что приводит к отсутствию в результатах расчетов послезаходного пика восточного электрического поля на геомагнитном экваторе, которое и служит основным механизмом формирования $F3$ -слоя в это время. На втором интервале слой $F3$ формируется в результатах модельных расчетов, но либо отсутствует в данных наблюдений, либо существует, но $foF3 < foF2$.

На рисунках 3 и 4 представлены вертикальные профили N_e в различные моменты времени, полученные по данным РНР в Якамарке в спокойных условиях и по результатам расчетов в модели ГСМ ТИП в спокойных условиях (24 сентября), а также в главную (26 сентября) и восстановительную (29 сентября) фазы геомагнитной бури.

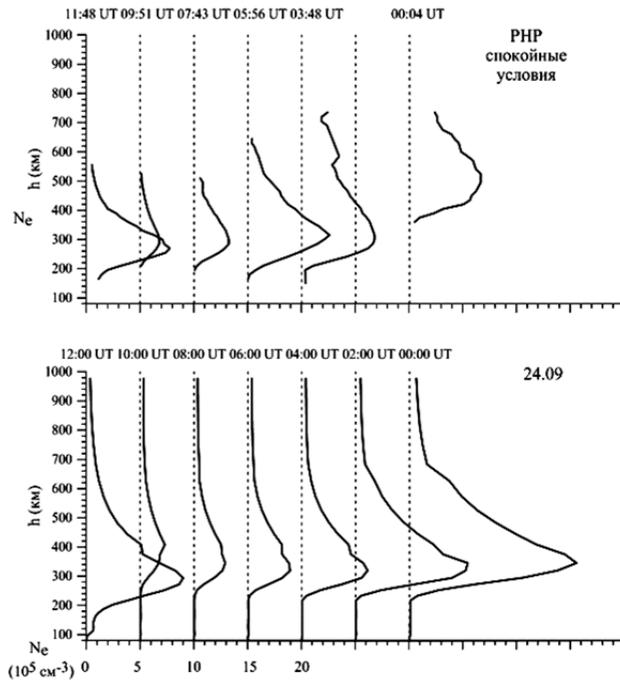


Рис. 3. Вертикальные профили N_e над Якамаркой в сентябре 2011 г. в период с 00:00 UT до 12:00 UT. Вверху – данные измерений РНР в спокойных условиях, внизу – результаты расчетов, полученные в модели ГСМ ТИП в спокойных условиях (24.09)



Из сравнения графиков, показанных на рисунке 3, видно, что в 00:00 UT данные наблюдений и результаты расчетов заметно отличаются. Значение максимума N_e рассчитанного профиля в два раза превышает значение максимума, полученного по данным РНР, и этот максимум расположен на высоте ~ 350 км, что на 170 км ниже, чем по данным РНР.

Профили для 04:00 UT очень похожи. Модельный профиль для 06:00 UT согласуется с экспериментальным по высоте максимума, но его значение в ~ 2 раза меньше. Экспериментальные и модельные профили для 08:00, 10:00 и 12:00 UT наилучшим образом согласуются между собой по значениям максимума. Высоты максимумов в 08:00 и 12:00 UT также выявляют удовлетворительное согласие. В 12:00 UT в результатах модельных расчетов на высоте ~ 420 км формируется F3-слой, максимум которого превышает максимум F2-слоя, а высота удовлетворительно согласуется с высотой максимума F-слоя, полученной по данным РНР. Отметим также, что как по данным РНР, так и согласно результатам модельных расчетов в период 04:00–08:00 UT и в 12:00 UT формируется F3-слой, максимум которого меньше максимума F2-слоя, высота которого в расчетах меньше, чем по данным РНР. Общим для профилей N_e , показанных на рисунке 4 для интервала местного времени 08:00–19:00 LT (местное время для Jacamarca LT = UT – 5), служит то, что максимумы профилей, полученные в модели ГСМ ТИП, больше максимумов, полученных по данным РНР, и на них на всех виден, по крайней мере, один дополнительный слой F3.

На рисунках 3 и 4 F3-слой на профилях N_e по данным РНР проявляется в виде излома на высотах ~ 400 – 450 км. Такие из-

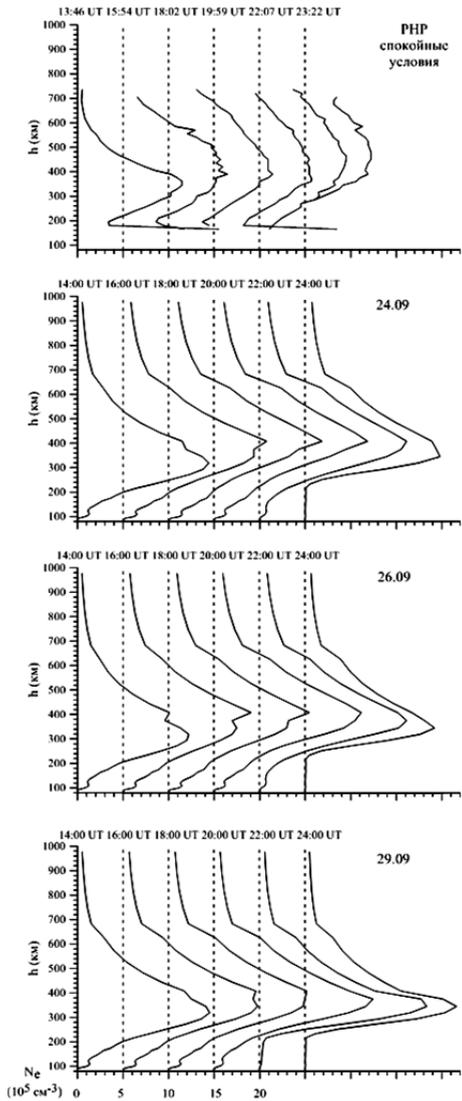


Рис. 4. Вертикальные профили N_e над Якамаркой в сентябре 2011 г. с 13:00 UT до 24:00 UT. Вверху – данные измерений РНР в спокойных условиях, ниже – результаты расчетов, полученные в модели ГСМ ТИП в спокойных условиях (24.09) и во время бури (26.09 и 29.09)



ломы видны практически на всех профилях РНР за исключением профиля для 10:00 UT, который является гладким. Все профили РНР на рисунке 4 либо содержат четкий $F3$ -слой (13:46 UT, 18:02 UT, 19:59 UT), либо являются сильно неоднородными с многочисленными минимумами и максимумами, один из которых на высоте ≥ 410 км может быть $F3$ -слоем.

Рассмотрим теперь профили, рассчитанные в модели ГСМ ТИП во время геомагнитной бури. К сожалению, для этого периода данные измерений РНР отсутствуют. Рисунок 4 для 26 сентября относится к главной фазе бури. Сравнивая профили, полученные для спокойных геомагнитных условий 24 сентября и в главную фазу бури 26 сентября, можно заметить уменьшение максимума F -области во время бури, то есть отрицательные ионосферные возмущения. Кроме того, отчетливо видны эффекты геомагнитной бури в поведении параметров не только $F2$ -слоя, но и $F3$ -слоя, который становится более четко выраженным и существует более продолжительное время. На фазе восстановления бури 29 сентября можно отметить понижения максимума F -области в первой половине дня и повышение во второй половине. Что касается $F3$ -слоя, то можно заметить его ослабление или даже полное исчезновение по сравнению с 24 и 26 сентября.

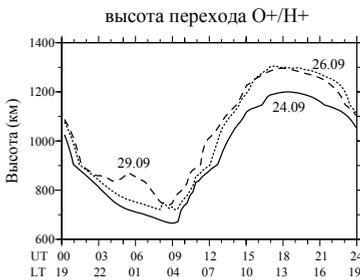


Рис. 5. Рассчитанные в модели ГСМ ТИП суточные вариации высоты перехода O^+/H^+ над станцией «Якамарка» для спокойных условий 24.09 (сплошная линия), в главную фазу бури 26.09 (пунктирная линия) и в восстановительную фазу бури 29.09 (штриховая линия)

высоты однородной атмосферы, а также с переносом плазмы вверх за счет электромагнитного дрейфа, который вместе с диффузией формирует фонтан-эффект, приводящий к уменьшению электронной концентрации в максимуме $F2$ -слоя на геомагнитном экваторе.

Из рисунка 6 видно, что высота максимума F -области h_{max} по данным РНР и ионозонда довольно хорошо согласуются между собой. При этом значения электронной концентрации в максимуме F -области N_{max} также хорошо согласуются в ночное время, однако дневные значения N_{max} по

На рисунке 5 представлены суточные вариации высоты перехода O^+/H^+ над *Jicamarca* для спокойных условий и во время главной и восстановительной фаз геомагнитных бурь. Высота перехода O^+/H^+ определяет границу между ионосферой и плазмосферой, выше которой доминирующим ионом становится ион H^+ . Заметим, что во время геомагнитных бурь высота перехода значительно возрастает днем, а в восстановительную фазу бури еще и ночью. Этот рост, по нашему мнению, связан с повышением электронной и ионной температур, и соответственно, с увеличением



данным ионозонда, которые можно считать эталонными, в 1.2–2.0 раза больше, чем по результатам РНР.

Именно этим объясняются различия между ионосферным электронным содержанием (IEC), рассчитанным в модели ГСМ ТИП и полученными по данным РНР, поскольку из рисунка 6 видно, что в спокойных условиях N_{max} рассчитанные в модели хорошо согласуются с данными ионозонда.

Таким образом, заниженные значения IEC , полученные по данным РНР, объясняются неточностью показаний радара в дневное время, что также подтверждается заниженными значениями N_e профилей, показанных на рисунках 3 и 4 в дневное время. Заметим, что разница между TEC , рассчитанным в модели ГСМ ТИП и показанным на этом рисунке, и IEC представляет собой плазмосферное электронное содержание (PEC) над Jicamarca.

Заключение

В работе показано, что результаты модельных расчетов согласуются с данными наблюдений РНР и ионозонда, как в спокойных условиях, так и во время геомагнитной бури. Профили N_e по данным РНР выявляют существование F3-слоя, который также формируется и в модельных расчетах. Показано, что РНР в дневное время дает заниженные значения N_{max} . Проведенные модельные расчеты TEC и IEC над Jicamarca позволили оценить вклад протоносферы в TEC .

Авторы выражают искреннюю благодарность Б. Схао за предоставленные экспериментальные данные и за длительное плодотворное сотрудничество.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ №МК-4866.2014.5, грантов РФФИ №12-05-31217, №14-05-00578 и Программы 22 РАН.

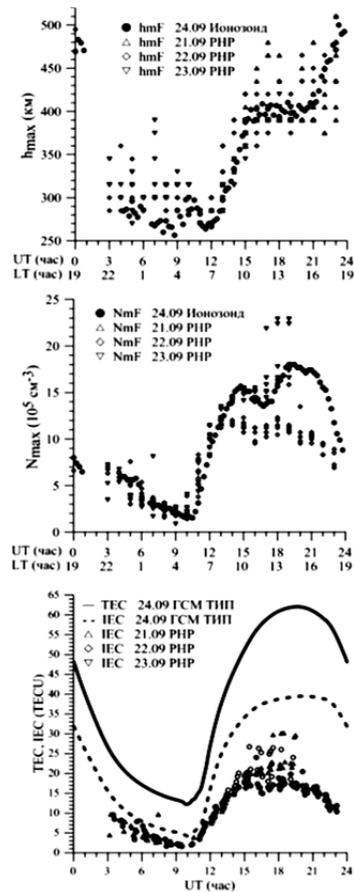


Рис. 6. Суточные вариации h_{max} (вверху) и N_{max} (посередине) над Якамаркой по данным ионозонда и РНР в спокойных условиях в сентябре 2011 г. Внизу — суточные вариации IEC , рассчитанного в интервале высот 210–550 км по данным ионозонда и по модели ГСМ ТИП, а также TEC , рассчитанного в модели ГСМ ТИП



Список литературы

1. Balan N., Bailey G.J., Abdu M.A. et al. Equatorial plasma fountain and its effects over three locations: Evidence for an additional layer, the F3 layer // J. Geophys. Res. 1997. Vol. 102, №A2. P. 2047–2056.
2. Klimenko M. V., Zhao B., Karpachev A. T., Klimenko V. V. Stratification of the low-latitude and near-equatorial F2 layer, topside ionization ledge, and F3 layer. What we know about this? A review // Int. J. Geophys. 2012.
3. Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V. et al. Global model of the thermosphere-ionosphere-protonosphere system // PAGEOPH. 1988. Vol. 127. P. 219–254.
4. Клименко В.В., Клименко М.В., Брюханов В.В. Численное моделирование электрического поля и зонального тока в ионосфере Земли – 1. Постановка задачи // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, №4. С. 485–494.
5. Klimenko M. V., Klimenko V. V., Ratovsky K. G. et al. Numerical modeling of ionospheric effects in the middle- and low-latitude F region during geomagnetic storm sequence of 9–14 September 2005 // Radio Sci. 2011. Vol. 46.
6. Klimenko M. V., Klimenko V. V. Disturbance dynamo, prompt penetration electric field and overshielding in the Earth's ionosphere during geomagnetic storm // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2012. Vol. 90–91. P. 146–155.

Об авторах

Носиков Игорь Анатольевич – студент, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: Igor.Nosikov@gmail.com

Максим Владимирович Клименко – канд. физ.-мат. наук, науч. сотр., ЗО ИЗМИРАН, Калининград.

E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Владимир Викторович Клименко – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., ЗО ИЗМИРАН, Калининград.

E-mail: vvk_48@mail.ru

Владимир Трухлик – д-р, науч. сотр., Институт физики атмосферы, Прага.

E-mail: vtr@ufa.cas.cz

About the authors

Igor Nosikov – student, I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: Igor.Nosikov@gmail.com

Maxim Klimenko – PhD, Research Fellow W.O. IZMIRAN, Kaliningrad.

E-mail: maksim.klimenko@mail.ru

Vladimir Klimenko – PhD, Senior Research Fellow W.O. IZMIRAN, Kaliningrad.

E-mail: vvk_48@mail.ru

Vladimir Truhlik – Res., PhD, Institute of Atmospheric Physics, Prague.

E-mail: vtr@ufa.cas.cz