

Параметры ионосферы: данные системы FormoSat-3/COSMIC, ионозондов и моделей IRI, NeQuick

Е.С. Андреева, М.В. Локота

Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова

Москва 119991, Россия

E-mail: es_andereeva@mail.ru

Проведено сопоставление результатов моделей NeQuick, IRI-2001, IRI-2007 с данными радиозатменных профилей системы FormoSat-3/COSMIC при различных уровнях геомагнитной возмущенности. Проведенный сравнительный анализ показал, что модели NeQuick, IRI-2001, IRI-2007 хорошо воспроизводят максимальный уровень электронной концентрации и хуже отображают профиль электронной концентрации. Значения вертикального TEC, полученные с помощью моделей IRI и NeQuick оказались завышенными относительно значений вертикального TEC, вычисленных по P3-профилям. Наибольшие расхождения наблюдались в регионе Экваториальной аномалии. В проведенном сравнении наилучшие результаты были продемонстрированы моделью IRI-2007. Представлены результаты верификации радиозатменных данных системы FormoSat-3/COSMIC по измерениям ионозондов в различных регионах мира за период 2006–2008гг. Показано, что с ростом геомагнитной возмущенности увеличивается расхождение критических частот, вычисленных из радиозатменных профилей электронной концентрации и по данным измерений ионозондов. Как правило, значения критических частот по данным измерений ионозондов выше значений критических частот из радиозатменных профилей. Наблюдались большие расхождения между значениями критических частот в районе Экваториальной аномалии как в возмущенных так и в спокойных условиях.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферные модели, радиозатменный метод, критические частоты, электронная концентрация, полное электронное содержание.

Введение

В апреле 2006 г. была успешно введена в действие новая спутниковая система FormoSat-3/COSMIC (Taiwan's Formosa Satellite Mission #3 and Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) для проведения исследований по климату, метеорологии и ионосфере. Радиозатменный (P3) или рефрактометрический метод исследования ионосферы основан на квазикасательном зондировании среды на трассах «спутник-спутник» (Phinney et al., 1968; Kursinski et al., 1996; Яковлев, 1998). Система FormoSat-3/COSMIC, регистрирующая сигналы GNSS на низкоорбитальных спутниках, реализует P3-метод и позволяет получать профили электронной концентрации ионосферы. Система FormoSat-3/COSMIC состоит из 6 низкоорбитальных спутников (FM1-FM6) с высотой орбиты порядка 800 км, вращающихся в 6 плоскостях, расходящихся друг от друга на 30°. Спутники системы имеют на борту трехчастотные передатчики для низкоорбитальной RT и принимают сигналы системы GPS. В среднем в течение дня можно получить порядка ~ 1000...2500 P3-профилей электронной плотности ионосферы. Радиотомографический (РТ) метод с наземным приемом подразумевает зондирование ионосферы в широком диапазоне различных положений приемопередающих систем. В этом смысле P3-метод, дающий ин-

тегралы от электронной плотности на семействе квазикасательных лучей (трассы «спутник-спутник»), является частным случаем РТ-метода, поэтому возможно построение процедуры включения РЗ-данных в общую томографическую схему (Куницын и др., 2007).

Ионосферные модели применяются для описания параметров ионосферы в областях, где отсутствуют данные каких-либо измерений. Наиболее широко используются многими научными группами ионосферные модели IRI и NeQuick, поэтому результаты сравнительного анализа модельных данных с РЗ-профилями электронной концентрации системы FormoSat-3/COSMIC, важны как для развития и совершенствования ионосферных моделей, так и для многих радиофизических и геофизических приложений. Цель данной работы - верификация РЗ-данных системы FormoSat-3/COSMIC по измерениям ионозондов в различных регионах мира за период 2006–2008 гг., а также сопоставление данных моделей NeQuick, IRI-2001, IRI-2007 с РЗ-профилями электронной концентрации системы FormoSat-3/COSMIC при различных уровнях геомагнитной активности.

Верификация радиозатменных профилей электронной плотности системы Formosat-3/COSMIC по данным ионозондовых измерений

Ионозондовые измерения являются наиболее апробированным среди существующих методов зондирования ионосферы. Следует отметить, что большое число работ посвящено сопоставлению РЗ-профилей электронной плотности с данными измерений ионозондов по значениям критических частот (Hajj et al., 1998; Tsai et al., 2004; Jiuhou et al., 2007; Garcia-Fernandez et al., 2005). Отметим, что РЗ-профили лучше согласуются с данными среднеширотных ионозондов. В области низких широт значения РЗ-профилей систематически занижены, что, по-видимому, обусловлено влиянием экваториальной аномалии. В работах (Hajj et al., 1998; Jiuhou et al., 2007; Jakowski et al., 2004) было проведено сопоставление РЗ-профилей с данными радаров некогерентного рассеяния для спокойного периода ($Kp < 2$), которое в целом показало хорошее согласование в рамках точностей обоих методов.

Ниже представлены результаты верификации РЗ-профилей системы Formosat-3/COSMIC по данным ионозондовых измерений по критическим частотам (f_oF_2) за период с апреля 2006 г. по сентябрь 2008 г. Ионозонды расположены в трех различных регионах: в Гаконе (район Аляски) с координатами (62,4°E, -145°W); в Чунгли (о. Тайвань) с координатами (24,9°N, 121,2°E) и в Тромсе (регион северной Европы) с координатами (69,7°N, 19°E). РЗ-профили выбирались в окрестности (± 150 км) ионозондов. Почасовые данные f_oF_2 ионозондов были предварительно проинтерполированы, чтобы получить значения

f_0F2 для времени РЗ-профилей. Для проведения сопоставления вычислялись средние значения погрешности f_0F2 из РЗ-профилей относительно f_0F2 -ионозондов, т.е.

$$\langle \Delta f_0F2 \rangle = \frac{\sum_1^M (f_0F2_Cosmic - f_0F2_Ion)}{M}, \quad (1)$$

где f_0F2_Cosmic - значения критических частот из РЗ-профилей, f_0F2_Ion - значения критических частот по данным ионозондов. Также вычислялись СКО соответствующих значений f_0F2 из РЗ-профилей относительно f_0F2 -ионозондов, т.е.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^M (f_0F2_Cosmic - f_0F2_Ion)^2}{M}}. \quad (2)$$

Были выделены три группы по индексу геомагнитной возмущенности: невозмущенный период ($0 \leq Kp \leq 2$), слабовозмущенный период ($2 < Kp < 4$) и возмущенный период ($Kp \geq 4$).

В окрестности ионозонда в Гаконе (регион Аляски) были проанализированы 775 РЗ-профилей: 573 ($0 < Kp \leq 2$), 160 ($2 < Kp < 4$) и 42 ($Kp \geq 4$). Критические частоты f_0F2 из РЗ-профилей соответствуют критическим частотам f_0F2 ионозонда в Гаконе для спокойных периодов (средняя погрешность f_0F2 из РЗ-профилей составляет 0,01 МГц). С ростом геомагнитной возмущенности расхождение между критическими частотами увеличивается до -0,5 МГц, т.е. значения f_0F2 -ионозонда превышают f_0F2 из РЗ-профилей (1). Значения σ при увеличении геомагнитной возмущенности изменилось в 2 раза: от $\pm 1,07$ МГц до $\pm 2,01$ МГц.

В окрестности ионозонда в Тромсе (регион северной Европы) были проанализированы 706 профилей: 525 ($0 < Kp \leq 2$), 155 ($2 < Kp < 4$) и 26 ($Kp \geq 4$). Для спокойных условий критические частоты f_0F2 из РЗ-профилей соответствуют критическим частотам f_0F2 ионозонда в Тромсе (средняя погрешность f_0F2 из РЗ-профилей составляет порядка 0,04 МГц). В слабовозмущенные и возмущенные периоды расхождение критических частот увеличивается от -0,1 МГц до -0,5 МГц соответственно, причем значения σ изменяются от $\pm 0,65$ МГц до $\pm 1,37$ МГц, т.е. практически удваиваются. Таким образом, с ростом геомагнитной возмущенности критические частоты РЗ-профилей занижены относительно критических частот по данным ионозондов как в Гаконе, так и в Тромсе.

Из-за нестабильной работы ионозонда в Чунгли (о. Тайвань) оказалось невозможным провести систематическую верификацию РЗ-профилей в районе о. Тайвань. По этой причине были проанализированы всего 30 РЗ-профилей за август-сентябрь 2006 г. Обна-

ружено, что даже в спокойных и слабовозмущенных условиях ($Kp < 4$) разброс значений f_0F2 достаточно велик, что, по-видимому, связано с наличием сильных градиентов электронной плотности вблизи северного гребня экваториальной аномалии.

Верификация моделей NeQuick, IRI-2001 и IRI-2007 по данным радиозатменных профилей системы Formosat-3/COSMIC

В настоящее время наиболее разработанной и динамично развивающейся является модель IRI. Основными источниками данных, которые используются в данной модели, являются: всемирная сеть ионозондов, спутниковые и ракетные измерения, а также данные радаров некогерентного рассеяния. Модель IRI позволяет вычислять профили электронной концентрации (в диапазоне высот от 50 до 2000 км), полное электронное содержание (TEC), температуры электронов, ионов и т.д. в зависимости от времени и координат (Bilitza, 2003). Модель NeQuick – ионосферная эмпирическая модель, в которой используются данные глобальной сети ионозондов, а также индексы солнечной активности (например, число солнечных пятен). Модель NeQuick позволяет получать профили электронной концентрации до высот 20 000 км в зависимости от времени и географических координат (Coisson et al., 2006; Radicella, 2009).

Ниже представлены результаты сравнительного анализа профилей по данным моделей NeQuick, IRI-2001 и IRI-2007 с данными P3-профилей системы Formosat-3/COSMIC за период с апреля 2006 г. по сентябрь 2008 г. Сопоставление проводилось как по критическим частотам f_0F2 , так и по вертикальному полному электронному содержанию $VTEC$. Аналогично вычислялись средние значения погрешностей модельных значений f_0F2 , $VTEC$ относительно данных P3-профилей, т.е. $\langle \Delta f_0F2 \rangle$ и $\langle \Delta VTEC \rangle$, и соответствующие СКО (σ , МГц и σ , TECU) по формулам (1) и (2). Для сравнительного анализа были также рассмотрены три группы по индексу геомагнитной возмущенности.

В качестве иллюстрации на *рис. 1* представлены примеры вертикальных профилей электронной концентрации для спокойного периода ($Kp \leq 2$), вычисленных по P3- данным системы Formosat-3/COSMIC и по модельным данным NeQuick, IRI-2001, IRI-2007, для региона Аляска (окрестность ионозонда в Гаконе). Модельные профили превышают значения электронной концентрации P3-профиля в F -области (диапазон высот выше 150 км), при этом модель NeQuick лучше отображает профиль электронной концентрации в области E , чем модели IRI-2001, IRI-2007 (*рис. 1*).

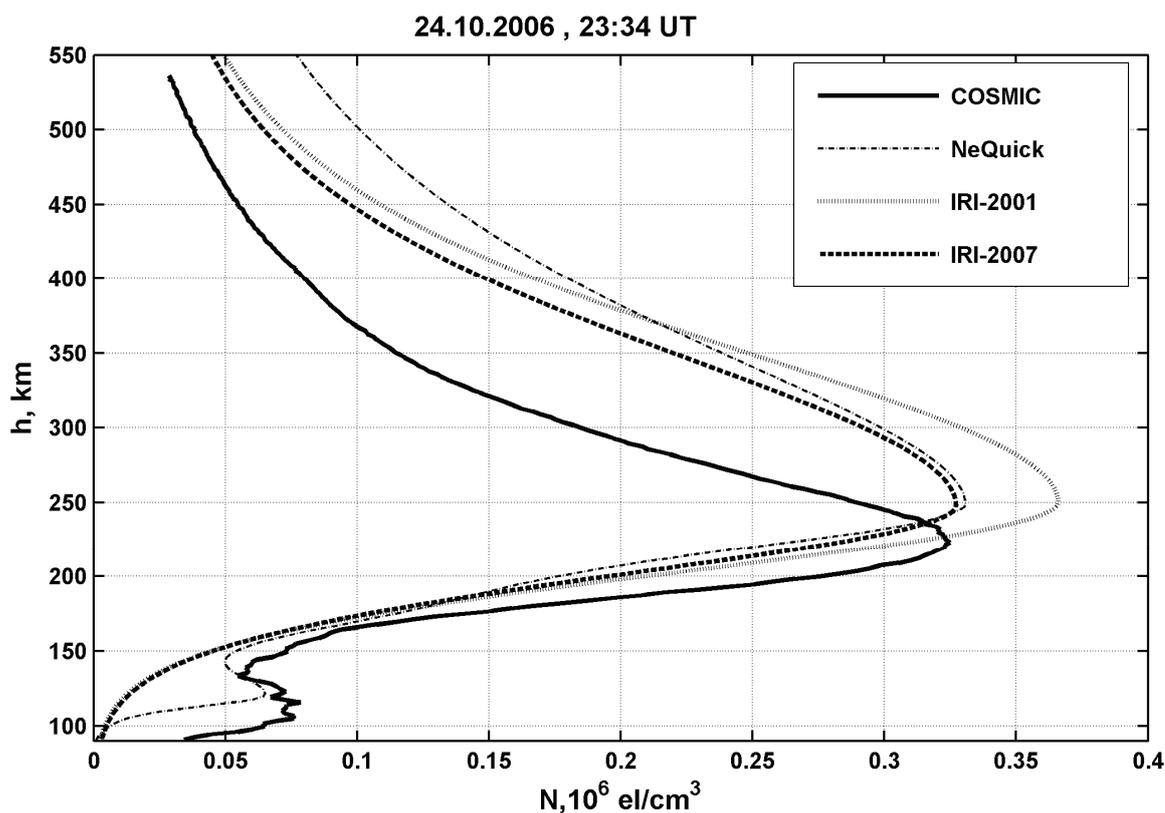


Рис. 1. Примеры вертикальных профилей электронной концентрации по РЗ-данным системы Formosat-3/Cosmic и данным моделей IRI-2001, IRI-2007, NeQuick в районе Аляски 24.10.2006 (23:34 UT)

Результаты верификации модели NeQuick по данным РЗ-профилям представлены в табл. 1. Для региона Аляски были проанализированы 775 профилей: 573 ($0 \leq K_p \leq 2$), 160 ($2 < K_p < 4$) и 42 ($K_p \geq 4$). Для региона северной Европы — 706 профилей: 525 ($0 \leq K_p \leq 2$), 155 ($2 < K_p < 4$) и 26 ($K_p \geq 4$). В регионе о. Тайвань для сравнительного анализа были выбраны 652 профиля: 467 ($0 \leq K_p \leq 2$), 157 ($2 < K_p < 4$) и 28 ($K_p \geq 4$). Модельные значения критических частот и VTEC хорошо согласуются с экспериментальными РЗ-данными для спокойных условий. Из табл. 1 видно, что значения VTEC по данным модели NeQuick превышают значения VTEC по РЗ-профилям в каждом из трех регионов. В регионе о. Тайвань СКО (σ , TECU) модельных значений VTEC относительно VTEC по РЗ-данным в 2–3,5 раза выше, чем для регионов Аляски и Северной Европы. Следует отметить высокие значения коэффициента корреляции (от 0,7 до 0,85) практически независимо от уровня геомагнитной возмущенности как при сопоставлении по критическим частотам, так и по значениям VTEC.

Результаты верификации модели IRI-2001 представлены в табл. 2. Для спокойного периода средние значения погрешностей критических частот по модельным данным составили: -0,5 МГц (регион Аляски) и -0,3 МГц (регион северной Европы). В районе о. Тайвань расхождения по критическим частотам больше и составили порядка -1,1 МГц, т.е. модельные значения критических частот завышены относительно РЗ-данных.

Таблица 1. Результаты верификации модели NeQuick по данным P3-профилям

<i>Сопоставление с моделью NeQuick</i>			
<i>Регион Аляски (Гакона)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0,05	-0,20	-0,30
δ , МГц	$\pm 0,52$	$\pm 0,62$	$\pm 0,62$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-0,70	-1,30	-1,40
δ , TECU	$\pm 1,90$	$\pm 2,60$	$\pm 2,62$
<i>Северная Европа (Тромсе)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	0,14	-0,005	0,15
δ , МГц	$\pm 0,62$	$\pm 0,58$	$\pm 0,61$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-0,60	-0,40	0,26
δ , TECU	$\pm 1,67$	$\pm 1,68$	$\pm 1,70$
<i>о. Тайвань (Чунгли)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0,4	0,20	0,02
δ , МГц	$\pm 1,27$	$\pm 1,22$	$\pm 1,46$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-5,80	-4,90	-5,20
δ , TECU	$\pm 8,37$	$\pm 7,39$	$\pm 8,56$

Таблица 2. Результаты верификации модели IRI-2001 по данным P3-профилей электронной плотности системы Formosat-3/COSMIC

<i>Сопоставление с моделью IRI -2001</i>			
<i>Регион Аляски (Гакона)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0,50	-0,60	-0,40
δ , МГц	$\pm 0,75$	$\pm 0,87$	$\pm 0,69$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-1,10	-1,30	-0,6
δ , TECU	$\pm 1,88$	$\pm 1,93$	$\pm 1,55$
<i>Северная Европа (Тромсе)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0,30	-0,40	-0,08
δ , МГц	$\pm 0,75$	$\pm 0,80$	$\pm 0,83$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	0,11	-0,90	0,93
δ , TECU	$\pm 0,98$	$\pm 1,87$	$\pm 1,43$
<i>о. Тайвань (Чунгли)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-1,10	0,70	0,20
δ , МГц	$\pm 1,81$	$\pm 1,68$	$\pm 2,25$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-8,10	-6,80	-6,30
δ , TECU	$\pm 10,50$	$\pm 9,45$	$\pm 10,00$

Модельные значения $VTEC$ также превышают соответствующие значения $VTEC$ из P3-профилей (табл. 2). Погрешности модельных значений $VTEC$ в регионе о. Тайвань в 5–6 раз выше, чем в регионах Аляски и северной Европы, и составили -8.1TECU для спокойных геомагнитных условий.

Результаты верификации модели IRI-2007 представлены в табл. 3. Следует отметить, что модель IRI-2007 показывает лучшее согласование с данными P3-профилей, чем модель IRI-2001. Средние значения погрешностей модельных критических частот варьи-

ровались от -0,05 МГц до 0,2 МГц для спокойных и слабозвущенных условий ($Kp < 4$). Для сравнения в случае модели IRI-2001 эти вариации составляли $-1,1 \div 0,7$ МГц (табл. 2). СКО критических частот по модели IRI-2007 (σ , МГц - табл. 3) заметно меньше, чем для модели IRI-2001 (σ , МГц - табл. 2). Модель IRI-2007 также дает меньше погрешностей при сопоставлении с РЗ-данными по значениям $VTEC$.

Таблица 3. Результаты верификации модели IRI-2007 по РЗ-профилям электронной плотности системы Formosat-3/COSMIC

<i>Сопоставление с моделью IRI -2007</i>			
<i>Регион Аляски (Гакона)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0,05	-0,17	-0,10
δ , МГц	$\pm 0,49$	$\pm 0,54$	$\pm 0,53$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-0,04	-0,2	0,07
δ , TECU	$\pm 0,97$	$\pm 0,95$	$\pm 1,28$
<i>Северная Европа (Тромсе)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	0,20	0,07	0,31
δ , МГц	$\pm 0,66$	$\pm 0,58$	$\pm 0,72$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	0,11	0,29	0,93
δ , TECU	$\pm 0,98$	$\pm 1,11$	$\pm 1,43$
<i>о. Тайвань (Чунгли)</i>	$0 \leq Kp \leq 2$	$2 < Kp < 4$	$Kp \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0,08	0,14	0,84
δ , МГц	$\pm 1,3$	$\pm 1,38$	$\pm 2,16$
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-4,18	-3,32	-2,33
δ , TECU	$\pm 6,61$	$\pm 6,18$	$\pm 6,42$

Проведенный сравнительный анализ показал, что модель IRI-2007 лучше согласуется с данными РЗ-эксперимента, чем модель IRI-2001. Значения критических частот по данным модели IRI-2001 оказались систематически завышены относительно соответствующих значений по данным IRI-2007 вне зависимости от уровня геомагнитной возмущенности.

Выводы

Проведенные исследования показали следующее:

- для спокойных условий наблюдается хорошее согласование между значениями $f_0 F2$, вычисленных из РЗ-профилей, и значениями $f_0 F2$ ионозондов;
- с ростом геомагнитной возмущенности увеличивается расхождение критических частот. Как правило, значения $f_0 F2$ ионозондов выше значений $f_0 F2$ из РЗ-профилей.

Наблюдались большие расхождения между значениями f_0F2 из P3-профилей и значениями f_0F2 ионозонда в Чунгли (район о. Тайвань) даже в спокойных и слабовозмущенных условиях, что может быть обусловлено присутствием экваториальной аномалии и больших градиентов.

Модель NeQuick:

– значения f_0F2 , вычисленные по данным модели NeQuick, хорошо согласуются со значениями f_0F2 -P3 профилей во всех трех регионах практически независимо от уровня геомагнитной возмущенности;

– значения VTEC, вычисленные по данным модели NeQuick, превышают значения VTEC из P3-профилей. Погрешности модельных значений VTEC в районе о. Тайвань в 2–3,5 раза превышают погрешности модельных значений VTEC в районах Аляски и Тромсе.

Модели IRI-2001 и IRI-2007:

Значения f_0F2 по данным моделей IRI-2001 и IRI-2007 в целом соответствуют значениям f_0F2 по P3-профилям и слабо зависят от геомагнитной активности. Модель IRI-2007 лучше согласуется с данными P3-эксперимента в спокойный период, чем модель IRI-2001. Значения f_0F2 по модели IRI-2001 систематически завышены (на ~15%) относительно значений f_0F2 по модели IRI-2007. Значения VTEC, вычисленные по моделям IRI-2001/2007 превышают значения VTEC из P3-профилей, причем значительно в районе о. Тайвань.

Проведенный сравнительный анализ показал, что модели NeQuick, IRI-2001, IRI-2007 хорошо воспроизводят максимальный уровень электронной концентрации практически независимо от уровня геомагнитной возмущенности. Однако, модели хуже отображают профиль электронной концентрации, особенно в районе о. Тайвань, что может быть связано с наличием больших градиентов (например, экваториальной аномалии) электронной плотности. При этом модель IRI-2007 дает меньшие погрешности модельных значений VTEC относительно значений VTEC из P3-профилей.

Таким образом, P3-профили слабовозмущенной ($Kp < 4$) среднеширотной и субавроральной ионосферы могут быть использованы для различных геофизических и радиофизических приложений, и как дополнительная проекция в методе радиотомографии ионосферы. В случае приэкваториальной ионосферы необходимо проводить дополнительные исследования.

Авторы выражают благодарность Центру дистанционного зондирования и космических исследований (Тайвань, Чунгли) за предоставление данных по радиозатменным профилям системы Formosat-3/Cosmic, сотрудникам National Geophysical Data Center

(NGDC-NOAA) за предоставленную возможность пользования базой данных SPIDR (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты: 10-05-01126 и 11-05-01157).

Литература

1. Куницын В.Е., Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева, Радиотомография ионосферы. М: Физматлит, 2007.
2. Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М: Научная книга, 1998.
3. Bilitza D., B.W. Reinisch, International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Advances in Space Research. 2008. Vol. 42. P. 599–609.
4. Coïsson P., S.M. Radicella, R. Leitinger, B. Nava, Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations // Advances in Space Research. 2006. Vol. 37. P. 937–942.
5. Garcia-Fernandez M., Hernandez-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Performance of the improved Abel transform to estimate electron density profiles from GPS occultation data // GPS Solution. 2005. Vol. 9. P. 105–110.
6. Hajj G.A., Remans L.J., Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment // Radio Sci. 1998. Vol. 33. No. 1. P. 175–190.
7. Jakowski N., K. Schlegel, C. Stolle, M. Rietveld, Comparison of high latitude electron density profiles obtained with the GPS radio occultation technique and EISCAT measurements // Annales Geophysicae. 2004. Vol. 22. P. 2015–2022.
8. Jiuhou L., S. Syndergaard, A.G. Burns, C.S. Stanley, Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground based observations and model predictions: Preliminary results // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. P. A07308. Doi:10.1029/2006JA012240.
9. Phinney R.A., Anderson D.L., The radio occultation method for studying planetary atmospheres // Joun. Geoph. Res. 1968. Vol. 73. No. 5. P. 1819–1927.
10. Radicella S.M., The NeQuick model genesis, uses and evolution // Annals of Geophysics. 2009. Vol. 52. No. 3/4. P. 1049–1059.
11. Tsai L.C., W.H. Tsai, Improvement of GPS/MET Ionospheric Profiling and Validation Using the Chung-Li Ionosonde Measurements and the IRI model // Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science. 2004. Vol. 15. No. 4. P. 589–607.

Ionospheric parameters: FormoSat-3/COSMIC radio occultation data, ionosonde measurements, IRI and NeQuick model data

E.S. Andreeva, M.V. Lokota

M.V. Lomonosov Moscow State University
Moscow 119991, Russia
E-mail: es_andreeva@mail.ru

The results of comparisons of the IRI-2001, IRI-2007, NeQuick models with the radio occultation profiles for different geomagnetic conditions are reported. Our analysis showed that models NeQuick, IRI-2001, IRI-2007 rather well reproduce the maximum values of electron density and much worse electron density profiles. Values of VTEC, simulated by IRI and NeQuick models, in comparison with values calculated from radio occultation profiles are overestimated. The largest differences were detected in the region of the Equatorial anomaly. The best results were achieved in comparison with IRI-2007 model data. Verification results of FormoSat-3/COSMIC radio occultation data based on ionosonde measurements in different regions of the world during the period of 2006–2008 are presented. The discrepancy in the F2-layer critical frequencies from radio occultation profiles and ionosonde data increases with ionospheric storminess enhancement. Generally in comparison with radio occultation profiles ionosonds showed overestimated values. Large differences between the values of critical frequencies in Taiwan area both during disturbed and quiet geomagnetic conditions were observed.

Keywords: ionosphere, ionospheric models, radio occultation method, critical frequencies, electron density, total electron content.

References

1. Kunicyn V.E., E.D. Tereshhenko, E.S. Andreeva, *Radiotomografija ionosfery* (Radiotomography of ionosphere), Moscow: Fizmatlit, 2007.
2. Jakovlev O.I., *Kosmicheskaja radiofizika* (Cosmic radiophysics), Moscow: Nauchnaja kniga, 1998.
3. Bilitza D., B.W. Reinisch, International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters, *Advances in Space Research*, 2008, Vol. 42, pp. 599–609.
4. Coisson P., S.M. Radicella, R. Leitinger, B. Nava, Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations, *Advances in Space Research*, 2006, Vol. 37, pp. 937–942.
5. Garcia-Fernandez M., M. Hernandez-Pajares, J.M. Juan, J. Sanz, Performance of the improved Abel transform to estimate electron density profiles from GPS occultation data, *GPS Solution*, 2005, Vol. 9, pp. 105–110.
6. Hajj G.A., L.J. Remans, Ionospheric electron density profiles obtained with the Global Positioning System: Results from the GPS/MET experiment, *Radio Sci.*, 1998, Vol. 33, No. 1, pp. 175–190.
7. Jakowski N., K. Schlegel, C. Stolle, M. Rietveld, Comparison of high latitude electron density profiles obtained with the GPS radio occultation technique and EISCAT measurements, *Annales Geophysicae*, 2004, Vol. 22, pp. 2015–2022.
8. Jiuhou L., S. Syndergaard, A.G. Burns, C.S. Stanley, Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground based observations and model predictions: Preliminary results, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, p. A07308, doi:10.1029/2006JA012240.
9. Phinney R.A., Anderson D.L., The radio occultation method for studying planetary atmospheres, *J. Geophys. Res.*, 1968, Vol. 73, No. 5, pp. 1819–1927.
10. Radicella S.M., The NeQuick model genesis, uses and evolution, *Annals of Geophysics*, 2009, Vol. 52, No. 3/4, pp. 1049–1059.
11. Tsai L.C., W.H. Tsai, Improvement of GPS/MET Ionospheric Profiling and Validation Using the Chung-Li Ionosonde Measurements and the IRI model, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Science*, 2004, Vol. 15, No. 4, pp. 589–607.