

УДК 551.510.5, 550.388.2

АНАЛИЗ ИОНОСФЕРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПО РАДИОЗАТМЕННЫМ, ИОНОЗОНДОВЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ И ДАННЫМ МОДЕЛЕЙ IRI, NEQUICK

Е.С. Андреева, В.Е. Куницын, М.В. Локота

ANALYSIS OF IONOSPHERIC PARAMETERS BASED ON RADIO OCCULTATION, IONOSONDE MEASUREMENTS, IRI AND NEQUICK MODEL DATA

E.S. Andreeva, V.E. Kunitsyn, M.V. Lokota

Представлены результаты верификации радиозатменных данных системы FormoSat-3/COSMIC по измерениям ионозондов в различных регионах в период 2006–2008 гг. Наблюдается хорошее согласие между значениями критических частот, вычисленных из радиозатменных профилей и по данным ионозондов, для спокойных условий. С ростом геомагнитной возмущенности увеличивается расхождение критических частот, вычисленных по радиозатметным профилям и по данным измерений ионозондов. Проведено сопоставление результатов моделей NeQuick, IRI-2001, IRI-2007 с радиозатменными профилями системы FormoSat-3/COSMIC при различных уровнях геомагнитной возмущенности.

Verification results of FormoSat-3/COSMIC Radio Occultation data based on ionosondes measurements in different regions of the world during the period of 2006–2008 are presented. The F2-layer critical frequencies yielded by radio occultation profiles are in fairly good agreement with those from ionosondes data for quiet geomagnetic conditions. The discrepancy in the F2-layer critical frequencies from radio occultation profiles and ionosondes data increases with ionospheric storminess enhancement. The results of comparisons of the IRI-2001, IRI-2007, NeQuick models with the radio occultation profiles for different geomagnetic conditions are reported.

Верификация радиозатменных профилей электронной плотности системы FormoSat-3/COSMIC по данным ионозондов

В работе представлены результаты верификации радиозатметных (P3) профилей системы FormoSat-3/COSMIC по данным ионозондов по критическим частотам (f_0F2) за период с апреля 2006 г. по сентябрь 2008 г. (построено около 35 000 высотных профилей электронной концентрации). Ионозонды расположены в трех различных регионах: в Гаконе (Аляска, 62.4° E, 145° W); в Чунгли (о. Тайвань, 24.9° N, 121.2° E) и в Тромсе (Северная Европа, 69.7° N, 19° E). P3-профили выбирались в окрестности ионозондов ± 150 км. Почасовые данные f_0F2 ионозондов были предварительно проинтерполированы, чтобы получить значения f_0F2 для времени P3-профилей. Кроме того, вычислялись средние значения погрешности f_0F2 по P3-профилям относительно f_0F2 по данным ионозондов, т. е.

$$\langle \Delta f_0F2 \rangle = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (f_0F2_{\text{cosmic}} - f_0F2_{\text{ion}}) \quad (1)$$

где f_0F2_{cosmic} – значения критических частот по P3-профилям, f_0F2_{ion} – значения критических частот по данным ионозондов. Также вычислялись СКО соответствующих значений f_0F2_{cosmic} относительно f_0F2_{ion} , т. е.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (f_0F2_{\text{cosmic}} - f_0F2_{\text{ion}})^2}{M}} \quad (2)$$

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

Результаты сравнительного анализа P3-профилей системы FormoSat-3/COSMIC с данными ионозондовых измерений в Гаконе и Тромсе в зависимости от уровня геомагнитной возмущенности представлены на рис. 1. На вертикальной оси показаны средние значения

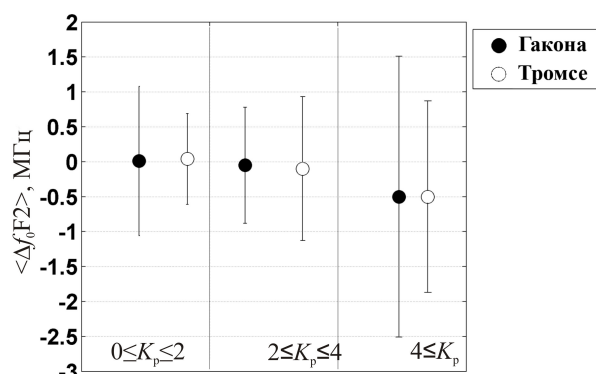


Рис. 1. Средние значения погрешностей критических частот по P3-профилям относительно критических частот по данным ионозондов в Гаконе и Тромсе в зависимости от уровня геомагнитной возмущенности.

ния погрешности f_0F2_{cosmic} относительно f_0F2_{ion} (1) и отмечены соответствующие значения σ (2).

В окрестности Гаконы (регион Аляски) были проанализированы 775 P3-профилей: 573 ($0 < K_p < 2$), 160 ($2 < K_p < 4$) и 42 ($K_p \geq 4$). Проведенные исследования показали:

- для спокойных условий наблюдается хорошее согласие между f_0F2_{cosmic} и f_0F2_{ion} .
- с ростом геомагнитной возмущенности увеличивается расхождение критических частот, вычисленных по P3-профилям и по данным измерений ионозондов. Как правило, f_0F2_{ion} выше f_0F2_{cosmic} . Средняя погрешность критических частот по P3-профилям ($\langle \Delta f_0F2 \rangle$) составляет 0.01 ÷ -0.05 МГц ($0 \leq K_p \leq 2$); -0.05 ÷ -0.1 МГц ($2 < K_p < 4$); -0.5 МГц ($K_p \geq 4$).

Нестабильная работа ионозонда в Чунгли не позволила провести систематическую верификацию. Наблюдались большие расхождения между f_0F2_{cosmic} и f_0F2_{ion} даже в спокойных и слабозамущенных условиях, что может быть обусловлено присутствием экваториальной аномалии и больших градиентов электронной плотности: средняя погрешность $\langle \Delta f_0F2 \rangle$ варьировала от -0.9 МГц до -3.5 МГц.

Сопоставление с моделью NeQuick			
Аляска (Гакона)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0.05	-0.20	-0.30
σ , МГц	± 0.52	± 0.62	± 0.62
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-0.70	-1.30	-1.40
σ , TECU	± 1.90	± 2.60	± 2.62
Северная Европа (Тромсе)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	0.14	-0.005	0.15
σ , МГц	± 0.62	± 0.58	± 0.61
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-0.60	-0.40	0.26
σ , TECU	± 1.67	± 1.68	± 1.70
о. Тайвань (Чунгли)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0.4	0.20	0.02
σ , МГц	± 1.27	± 1.22	± 1.46
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-5.80	-4.90	-5.20
σ , TECU	± 8.37	± 7.39	± 8.56
Сопоставление с моделью IRI-2001			
Аляска (Гакона)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0.50	-0.60	-0.40
σ , МГц	± 0.75	± 0.87	± 0.69
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-1.10	-1.30	-0.6
σ , TECU	± 1.88	± 1.93	± 1.55
Северная Европа (Тромсе)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0.30	-0.40	-0.08
σ , МГц	± 0.75	± 0.80	± 0.83
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	0.11	-0.90	0.93
σ , TECU	± 0.98	± 1.87	± 1.43
о. Тайвань (Чунгли)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-1.10	0.70	0.20
σ , МГц	± 1.81	± 1.68	± 2.25
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-8.10	-6.80	-6.30
σ , TECU	± 10.50	± 9.45	± 10.00
Сопоставление с моделью IRI-2007			
Аляска (Гакона)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0.05	-0.17	-0.10
σ , МГц	± 0.49	± 0.54	± 0.53
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-0.04	-0.2	0.07
σ , TECU	± 0.97	± 0.95	± 1.28
Северная Европа (Тромсе)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	0.20	0.07	0.31
σ , МГц	± 0.66	± 0.58	± 0.72
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	0.11	0.29	0.93
σ , TECU	± 0.98	± 1.11	± 1.43
о. Тайвань (Чунгли)	$0 \leq K_p \leq 2$	$2 < K_p < 4$	$K_p \geq 4$
$\langle \Delta f_0 F2 \rangle$, МГц	-0.08	0.14	0.84
σ , МГц	± 1.3	± 1.38	± 2.16
$\langle \Delta VTEC \rangle$, TECU	-4.18	-3.32	-2.33
σ , TECU	± 6.61	± 6.18	± 6.42

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

Результаты верификации моделей по данным РЗ-профилей представлены в таблице.

Сравнительный анализ профилей по данным моделей NeQuick, IRI-2001 и IRI-2007 с данными РЗ-профилей системы FormoSat-3/COSMIC проводился за период с апреля 2006 г. по сентябрь 2008 г. Сопоставление проводилось как по критическим час-

тотам f_0F2 , так и по вертикальному полному электронному содержанию VTEC. Аналогично вычислялись средние значения погрешностей модельных значений f_0F2 , VTEC относительно данных РЗ-профилей, т. е. $\langle \Delta f_0 F2 \rangle$ и $\langle \Delta VTEC \rangle$, и соответствующие СКО (σ , МГц и σ , TECU) по формулам (1) и (2). Для сравнительного анализа также были рассмотрены три группы по индексу геомагнитной возмущенности.

В качестве иллюстрации на рис. 2 представлены вертикальные профили электронной концентрации

по РЗ-данным системы FormoSat-3/COSMIC и профили, вычисленные по данным моделей NeQuick, IRI-2001, IRI-2007, для района Аляски.

Верификация модели NeQuick по данным РЗ-профилей

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 ($K_p \geq 4$). Значения f_0F_2 , вычисленные по данным модели NeQuick, хорошо согласуются со значениями $f_0F_{2\text{cosmic}}$ во всех трех регионах практически независимо от уровня геомагнитной возмущенности: коэффициенты корреляции между модельными значениями f_0F_2 и $f_0F_{2\text{cosmic}}$ составляют 0.74–0.85;

Значения VTEC, вычисленные по данным модели NeQuick, превышают значения VTEC по РЗ-профилям. Погрешности модельных значений VTEC в районе о. Тайвань в 2–3.5 раза превышают погрешности модельных значений VTEC в регионах Аляски и Тромсе.

Модели IRI-2001 и IRI-2007

Модельные значения f_0F_2 в целом соответствуют $f_0F_{2\text{cosmic}}$ и слабо зависят от геомагнитной активности. Коэффициенты корреляции между модельными f_0F_2 и значениями $f_0F_{2\text{cosmic}}$ варьировали:

- для модели IRI-2001 от 0.85 ($K_p \leq 2$) до 0.7 ($K_p > 4$);
- для модели IRI-2007 от 0.88 ($K_p \leq 2$) до 0.78 ($K_p > 4$).

Модель IRI-2007 лучше согласуется с данными РЗ-эксперимента в спокойный период, чем модель IRI-2001. Значения f_0F_2 по модели IRI-2001 систематически завышены (на ~15 %) относительно значений f_0F_2 по модели IRI-2007.

Значения VTEC, вычисленные по моделям IRI-2001/2007, превышают значения VTEC по РЗ-профилям, причем значительно, в районе о. Тайвань.

Проведенный сравнительный анализ показал, что модели NeQuick, IRI-2001, IRI-2007 хорошо воспроизводят максимальный уровень электронной

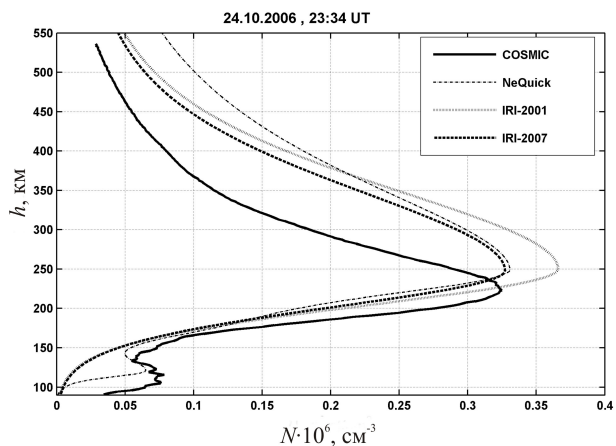


Рис. 2. Примеры вертикальных профилей электронной концентрации по РЗ-данным системы FormoSat-3/COSMIC и данным моделей IRI-2001, IRI-2007, NeQuick в районе Аляски 24.10.2006 г. (23:34 UT).

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 электронной плотности (например, экваториальной аномалии). При этом модель IRI-2007 дает меньшие погрешности значений VTEC относительно значений VTEC по РЗ-профилям.

В целом в пределах 10%-й погрешности согласуются лишь ~30 % модельных профилей, в пределах 15%-й – ~60 % модельных профилей во всех трех географических регионах.

Таким образом, РЗ-профили слабовозмущенной ($K_p < 4$) 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 использования базы данных SPIDR (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>). Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-05-00676 и 10-05-01126) и Минобрнауки (грант НК-56П-24, контракт П-167).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
 Яковлев О.И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
 Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 599–609.
 Consson P., Radicella S.M., Leitinger R., Nava B. Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 937–942.
 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. V. 9. P. 105–110.
 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. V. 33, N 1. P. 175–190.
 Hocke K., Igarashi K. Electron density in the F region derived from GPS/MET radio occultation data and comparison with IRI model // Earth Planets Space. 2002. V. 54. P. 947–954.
 Jakowski N., Tsybulya K., Radicella S.M., et al. Comparison of electron density profiles from CHAMP data with NeQuick model // Earth Observation With CHAMP. Results From Three Years In Orbit / Eds C. Reigber, H. Lühr, P. Schwintser, J. Wickert. 2005. P. 483–489.
 Juhou L., Syndergaard S., Burns A.G., Stanley C.S. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground based observations and model predictions: Preliminary results // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A07308. doi:10.1029/2006JA012240.

Kursinski E.R., Hajj G.A., Bertiger W.I., et al. Initial results of the radio occultation observations of Earth's atmosphere using Global Positioning Systems // *Science*. 1996. V. 271. P. 1107–1110.

Phinney R.A., Anderson D.L. The radio occultation method for studying planetary atmospheres // *J. Geophys. Res.* 1968. V. 73, N 5. P. 1819–1927.

Radicella S.M. The NeQuick model genesis, uses and evolution // *Ann. Geophys.* 2009. V. 52, N 3/4. P. 1049–1059.

Tsai L.C., Tsai W.H., Schreiner W.S., et al. Comparisons of GPS/MET retrieved ionospheric electron density and

ground based ionosonde data // *Earth Planets Space*. 2001. V. 53. P. 193–205.

Tsai L.C., Tsai W.H. Improvement of GPS/MET Ionospheric profiling and validation using the Chung-Li Ionosonde Measurements and the IRI model // *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* 2004. V. 15, N 4. P. 589–607.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва