

УДК 550.388.2

ВЗАИМНОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ДАННЫХ GPS, СПУТНИКОВЫХ ВЫСОТОМЕРОВ И РЕЗУЛЬТАТОВ ИОНОСФЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕЖДУНАРОДНОЙ СПРАВОЧНОЙ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ

Ю.В. Ясюкевич, Э.Л. Афраимович[†]

CROSS TESTING OF DATA FROM SATELLITE ALTIMETERS, GPS, AND RESULTS OF IONOSPHERIC MODELING USING INTERNATIONAL REFERENCE IONOSPHERE MODEL

Yu.V. Yasyukevich, E.L. Afraimovich[†]

В настоящей работе на основе большого статистического материала, охватывающего полный 23-й цикл солнечной активности, проведено взаимное сравнение полного электронного содержания (ПЭС) по данным спутниковых высотометров («Jason-1» и «Торех/Poseidon»), глобальных карт ПЭС GIM и региональных карт ПЭС US-TEC, рассчитываемых на основе GPS-измерений, а также сравнение со значениями ПЭС, полученными с использованием международной справочной модели ионосферы (IRI-2001, IRI-2007). Систематическое расхождение между различными данными достаточно существенное и может составлять несколько TECU (1 TECU=10¹⁶ м⁻²). В работе представлены средние характеристики, позволяющие оценить согласованность различных данных друг с другом. Отдельное внимание уделяется сравнению различных опций IRI, а также обзору работ, посвященных сравнению расчетов IRI с экспериментом.

In this study, we use large data set covering the entire 23rd solar cycle to cross test total electron content (TEC) data from satellite altimeters («Jason-1» and «Торех/Poseidon»), Global (GIM) and Regional (US-TEC) Ionosphere Maps and the International Reference Ionosphere model (IRI-2001, IRI-2007). Systematic discrepancy between data from different tools is significant and amounts several TECU (1 TECU=10¹⁶ м⁻²). The paper presents mean characteristics allowing us to evaluate correspondence of data from different tools. Particular emphasis is placed on comparison of different options of the IRI model and on review of papers devoted to comparison between IRI calculations and experimental data.

Введение

Для разного рода исследовательских и прикладных задач необходимо восстановление параметров ионосферы (навигация, радиолокация, связь). В ряде задач ключевым параметром является полное электронное содержание (ПЭС).

В качестве экспериментальных измерений ПЭС могут использоваться данные глобальных и региональных наземных сетей приемников навигационных систем (GPS, GLONASS, в ближайшие годы войдет в строй европейская система «Galileo») [1, 2], а также вычисленные по этим данным глобальные (GIM – Global Ionosphere Maps) [3] и региональные карты ПЭС [4]. Появилась возможность исследовать ионосферу над океаном на основе данных спутниковых высотометров («Торех/Poseidon», «Jason-1», «Jason-2») [5]. Общепринятой единицей измерения полного электронного содержания является TECU (Total Electron Content Unit; 1 TECU=10¹⁶ м⁻²).

Кроме того, существует ряд ионосферных моделей, которые позволяют рассчитать профиль электронной концентрации и ПЭС вдоль направления распространения сигнала. Международная справочная модель ионосферы (International Reference Ionosphere; IRI-2001, IRI-2007) – совместный проект URSI и COSPAR. В настоящее время IRI фактически является стандартом при расчете ионосферных параметров для различных исследовательских и прикладных задач [6].

Однако прежде чем использовать данные разных средств измерения ПЭС и моделирования, необходимо знать, насколько высока корреляция этих данных друг с другом. Для анализа мы использовали данные спутниковых высотометров «Торех/Poseidon» (10.08.1992–8.10.2005) и «Jason-1» (15.01.1992–31.12.2007), глобальные карты GIM, рассчитываемые JPLG, CODG, ESAG, UPCG (1.06.1998–

31.12.2007), региональные карты US-TEC (15.09.2004–31.12.2007) и соответствующие расчеты с использованием моделей IRI-2001 и IRI-2007.

Методика расчета

Чтобы оценить, насколько близко соответствие друг другу величин ПЭС, полученных различными способами, мы использовали общепринятые статистические параметры:

- среднее квадратичное отклонение (СКО), характеризующее согласованность различных видов измерений (либо эксперимента и модели),

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_1 - I_2)_i^2}, \quad (1)$$

где I_1, I_2 – вертикальное ПЭС, полученное по данным первого и второго источника (модели) соответственно, i – номер измерения, N – полное число измерений;

- среднее значение абсолютного отклонения, характеризующее наличие систематического расхождения,

$$\langle \Delta I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_1 - I_2)_i; \quad (2)$$

- среднее значение относительного отклонения

$$\left\langle \frac{\Delta I}{I} \right\rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(I_1 - I_2)_i}{I_1}; \quad (3)$$

- стандартное отклонение, характеризующее разброс модельных и экспериментальных данных относительно среднего значения,

$$D = \sqrt{\sigma^2 - \langle \Delta I \rangle^2}. \quad (4)$$

Для сравнения различных глобальных карт ПЭС, а также глобальных карт и данных моделирования

Таблица 1

Абсолютное (TECU)/относительное (%) среднее отклонение значений ПЭС по различным данным

	J-1-T/P	GIM	US-TEC	IRI-2001	IRI-2007
J-1, T/P	J-1-T/P 0.02±0.87/0.5±3	CODG: 3.1±8.6 (2.5) /16.6±32.1 (8.5) ESAG: 4±9.3 (3.0) /14.5±34.2 (14.5) JPLG: 0.3±7.4 (0.0) /2.14±28.2 (3.0) UPCG: 2.3±7.9 (2.0) /11.1±29.0 (6.0)	–	3.4±9.7 (3.0)/12.8±39 (27.0)	5.1±9.6 (3.5)/21.4±33.4 (32.0)
GIM	–	CODG-JPLG: –3.0±1.5/–13.7±5.7 CODG-ESAG: 0.7±1.2/2.6±4.0 CODG-UPCG: –0.9±1.6/–3.0±4.9	CODG: 0.5±2.5/0.3±59.8 JPLG: 2.9±2.4/27.3±19.7	CODG-U_S: –2.9±4.3/–20.0±24.4	CODG-U_I_S: 2.4±4.7/5.1±17.0 CODG-U_I_noS: 2.6±4.7/5.8±16.9 CODG-U_NQ_S: 3.5±4.7/10.8±14.6
US-TEC	Примечания: 1. В скобках даны наиболее вероятные значения разности ПЭС по различным данным. 2. J-1 – «Jason-1»; T/P – «Торех/Poseidon». 3. U – URSI, C – CCIR.			–1.3±3.0/–13.2±28.9	U, I, S 0.1±2.3/2.0±24.3
IRI-2001				URSI-CCIR –0.1±0.7/–0.03±2.35	U, I, S 5.3±1.1/20.5±3.3
IRI-2007				–	U_I_S-C_I_S: 0.1±0.6/0.6±2.5

Таблица 2

Среднее абсолютное (TECU)/относительное (%) отклонение ПЭС для различных параметров модели IRI

	07U_NQ_S	07U_I_noS	07C_NQ_S	07C_I_S	01U_S	01C_S
07U_I_S	1.1±0.4/5.9±2.9	0.2±0.3/0.9±1.1	1.0±0.8/5.6±4.5	0.1±0.6/0.6±2.5	–5.3±1.1/–26.0±5.4	–5.4±1.5/–26.0±5.2
07U_NQ_S	–	–0.9±0.4/–5.4±3.9	–0.1±0.7/–0.2±2.8	–1.0±0.7/–5.7±3.9	–6.4±1.3/–34.2±9.8	–6.5±1.6/–34.1±9.2
07U_I_noS	–	–	0.7±0.8/4.8±4.9	–0.1±0.7/–0.3±2.6	–5.5±1.3/–27.1±4.8	–5.6±1.7/–27.1±4.6
07C_NQ_S	Примечания: 1. 01 – IRI-2001, 07 – IRI-2007. 2. U – URSI, C – CCIR. 3. I – IRI topside, NQ – NeQuick topside. 4. S – модель шторма включена; noS – модель шторма отключена.			–0.9±0.3/–5.5±3.9	–6.3±1.2/–34.1±11.7	–6.4±1.2/–34.0±10.1
07C_I_S				–	–5.4±1.2/–26.9±6.7	–5.5±1.3/–26.8±4.9
01U_S				–	–	–0.1±0.7/–0.03±2.35

лучше использовать сравнение на основе расчета глобального электронного содержания (ГЭС) [7], так как за счет этого уменьшается влияние полярных областей, в которых отсутствуют непосредственные измерения, требующиеся при построении глобальных карт GIM. Для удобства ГЭС нормировалось на площадь поверхности Земли, что позволяет оценить значение средневзвешенного глобального ПЭС.

Результаты эксперимента

В табл. 1 мы свели среднее абсолютное (в единицах TECU) и относительное (в процентах) отклонение значений ПЭС по различным данным. В скобках дано наиболее вероятное значение разности ПЭС. После символа «±» приведено стандартное отклонение. В месте пересечения строки *A* и столбца *B* представлено среднее абсолютное (а также после знака «/» – относительное) отклонение данных, полученных с опциями *A*, от данных с опциями *B* ($I_{\text{GMT}})_A - (I_{\text{GMT}})_B$). Систематическое расхождение между данными различных средств измерения достаточно существенное и составляет несколько TECU даже для данных одного вида. Это необходимо учитывать при их использовании.

Систематическое отклонение в большинстве случаев оказывается существенно меньше стандартного отклонения. Только за счет глобального усреднения удастся выявить такое систематическое расхождение, что невозможно сделать, анализируя данные в отдельной точке.

В табл. 2 сведены средние (за период с 1998 г. по 2007 г.) значения абсолютного и относительного отклонения среднего глобального ПЭС для различных опций модели IRI. Сравнение осуществлялось на основе расчета средневзвешенного глобального ПЭС за 1998–2007 гг.

Для моделей IRI-2001 и IRI-2007 существует систематическое расхождение на уровне 5.5 TECU для одинаковых опций коэффициентов URSI и включенной модели «шторма». Модель «шторма» дает очень небольшое систематическое различие ~0.2 TECU. Использование профиля NeQuick вместо IRI приводит к систематическому занижению ~1 TECU.

Представляется интересным сравнение полученных результатов, касающихся точности модели IRI, с результатами, опубликованными в мировой литературе. В табл. 3 сведены результаты основных работ, посвященных точности модели IRI-2001. В ней также приведены результаты работ [6, 8], посвященных IRI-2007. В строке 9 приведены коэффициенты линейной регрессии значений ПЭС, полученных по данным GPS и рассчитанных с помощью модели IRI-2001 и IRI-2007 (с использованием модели NeQuick для расчета профиля ЭК выше максимума слоя F2). Как видно из таблицы, средняя точность модели над территорией суши составляет ~30 %. Кроме того, для отдельных сезонов относительная погрешность может быть более 100 %. Таким образом, полученные результаты глобального тестирования модели IRI за 23-й цикл солнечной актив-

Таблица 3

Точность модели IRI по результатам различных исследований

№	Параметр	Относительная погрешность	Данные	Работа
1	TEC	до 50 % ($F_{10.7} < 100$; низкие широты; день, вечер) до 40 % ($F_{10.7} > 150$, низкие широты; день)	T/P	[9]
2	TEC	IRI01+1.7 TECU=T/P (в среднем)	T/P	[10]
3	TEC	~41 % Глобально ~49 % Балтийское море ~26 % Средиземноморье ~41 % Индонезия ~33 % Тасманово море ~30 % Южнотихоокеанский регион	T/P	[11]
4	TEC	~30 %	T/P	[12]
5	TEC	<30 % (в среднем) 0.4–34.9 % (январь 1978) 10.2–31.6 % (сентябрь 1974)	Геостационары Boulder-ATS/6, Pahua-ATS/6	[13]
6	TEC	Высокая солнечная активность (2000, 2001). ~30 % (в среднем) Минимальная ошибка: 7–8 % (лето, полдень) Максимальная ошибка 85–125 % (зима, ночь)	GPS, Дигизонд	[14]
7	TEC	>30 % 0–184 %	GPS	[15]
8	TEC	IRI01 / 07NQ=A*GPS+B A=1.18, B=5.44/1.1, 0.28 – июнь 2000 г. 1.09, 0.97/ 1.04, 0.34 – март 2004 г. 1.85, 13.67/ 1.06, 2.74 – январь 2000 г. 0.77, 3.8 / 0.73, 2.25 – май 2004 г.	GPS	[8]
9	f_0F2	до 40 %	GPS (RT), Ионозонд	[16]
10	N_e	Умеренная солнечная активность: Зима – до 30 %; Весна – до 17 % Лето – до 25 %; Осень – до 7 % Высокая солнечная активность: Зима – до 31 %; Весна – до 15 % Лето – до 35 %; Осень – до 10 %	HP	[17]
11	f_0F2	до 70 %	HP	[18]
12	f_0F2	Millstone Hill до 10 % EISCAT до 50 %	HP	[19]
13	f_0F2	Лето до 10 % Осень и зима до 25 % Весна до 25 %	Ионозонд	[20]
14	f_0F2	День ~13 % Ночь ~30 %	Ионозонд	[21]
15	f_0F2	Сентябрь 2005 до 20 % Зима 2003 (ночь) до 15 %	Ионозонд	[22]
16	f_0F2	Июль 2003 до 25 % Июль 2004 до 10 % Июль 2005, 2006 до 5 %	Ионозонд	[23]
17	f_0F2	5–20 % (в среднем) ~30 % (за час до СТ)	Ионозонд	[24]
18	f_0F2	5–15 % день 15–30 %, ночь, вечер 30–40 % утро	Ионозонд	[25]
19	f_0F2	<30 %	ЛЧМ-ионозонд	[26]
20	N_e выше max F2	10 % – IRI 2.97 % – IRI corrected topside 1.96 % – IRI+NeQuick topside	ISIS-1, 2; Alouette-2	[6]
21	N_e	~15–20 % – авроральная область до 50 % – экваториальная область	CHAMP	[27]

ности согласуются с результатами других исследований, основанных на выборочных данных.

Заключение

В настоящей работе на основе большого статистического материала, охватывающего полный 23-й цикл солнечной активности, проведено взаимное

сравнение полного электронного содержания по данным различных средств. Наиболее вероятное значение отклонения ПЭС по данным спутниковых высотомеров и карт GIM различных лабораторий составляет: CODG – 2.5 TECU, ESAG – 3 TECU, JPLG – 0 TECU, UPCG – 2 TECU. Среднее значение разности ПЭС по данным CODG и US-TEC равно

0.5±2.5 TECU, IRI-2007 и US-TEC – –0.1±2.3 TECU. Выявлено систематическое занижение ~3 TECU модельных значений ПЭС по сравнению с экспериментальными данными спутниковых высотомеров над океаном. Систематическое расхождение ПЭС, полученного с помощью IRI-2001 и IRI-2007 (при расчетах со стандартными параметрами и включенной моделью «шторма»), составляет 5.3±1.1 TECU (20.5±3.3 %); GIM CODG и IRI-2007 – 2.4±4.7 TECU (5.1±17.0 %).

Авторы выражают благодарность В.Е. Куницыну, В.И. Куркину, А.В. Медведеву, А.В. Ойнацу, К.Г. Ратовскому, Ю.Я. Ружину за интерес к работе и плодотворные дискуссии; И.К. Едемскому и П.В. Татаринovu за помощь в предварительной обработке данных; Centre National d'Études Spatiales (France) и Jet Propulsion Laboratory (US) за данные спутниковых высотомеров. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант 07-05-00127.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: Theory and Practice. New York, Wien: Springer-Verlag, 1992. 327 p.
- <http://www.esa.int/esaNA/galileo.html>.
- Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS derived ionosphere TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33, N 3. P. 565–582.
- US-TEC Technical Document. Available // www.swpc.noaa.gov/ustec/docs/USTEC_TechnicalDocument.pdf.
5. <http://www.avisioceanobs.com/>.
- Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 599–609.
- Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Живетьев И.В. Солнечная активность и глобальное электронное содержание // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409, № 3. С. 399.
- Coisson P., Radicella S.M., Ciraolo L., et al. Global validation of IRI TEC for high and medium solar activity conditions // Adv. Space Res. 2008. V. 42. P. 770–775.
- Jee G., Schunk R.W., Scherliess L. Comparison of IRI-2001 with TOPEX TEC measurements // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. V. 67. P. 365–380.
- Codrescu M.V., Beierle K.L., Fuller-Rowell T.J., et al. More total electron content climatology from TOPEX/Poseidon measurements // Radio Sci. 2001. V. 36, N 2. P. 325–333.
- Orus R., Hernandez-Pajares M., Juan J.M., et al. Performance of different TEC models to provide GPS ionospheric corrections // J. Atmos. Terr. Phys. 2002. V. 64. P. 2055–2062.
- Migoya Orué Y.O., Radicella S.M., Coisson P., et al. Comparing TOPEX TEC measurements with IRI predictions // Adv. Space Res. 2008. V. 42, N 4. P. 757–762. doi:10.1016/j.asr.2007.09.041.
- Cabrera M.A., Ezquer R.G., Radicella S.M. Predicted and measured slant ionospheric electron content // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2005. V. 67. P. 1566–1572.
- Mosert M., Gende M., Brunini C., Ezquer R., Altadill D. Comparisons of IRI TEC predictions with GPS and digisonde measurements at Ebro // Adv. Space Res. 2007. V. 39. P. 841–847.
- Ezquer R.G., Brunini C., Mosert M., et al. GPS-VTEC measurements and IRI predictions in the South American sector // Adv. Space Res. 2004. V. 34. P. 2035–2043.
- Jin S., Park J.-U. GPS ionospheric tomography: A comparison with the IRI-2001 model over South Korea // Earth Planets Space. 2007. V. 59. P. 287–292.
- Spynev B.G., Potekhin A.P., Tashchilin A.V., et al. The comparison of incoherent scatter data with IRI-2001 in East-Siberian region // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1108–1112.
- Zhang S.-R., Holt J.M., Bilitza D.K., et al. Multiple-site comparisons between models of incoherent scatter radar and IRI // Adv. Space Res. 2007. V. 39. P. 910–917.
- Lei J., Liu L., Wan W., et al. Comparison of the first long-duration IS experiment measurements over Millstone Hill and EISCAT Svalbard radar with IRI2001 // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1102–1107.
- Rios V.H., Medina C.F., Alvarez P. Comparison between IRI predictions and digisonde measurements at Tucuman // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. 69. P. 569–577.
- Oinats A.V., Kotovich G.V., Rатовский К.Г. Comparison of the main ionospheric characteristics measured by the digisonde at Irkutsk in 2003 with IRI 2001 model data // Adv. Space Res. 2006. V. 37. P. 1018–1022.
- Rатовский К.Г., Oinats A.V., Medvedev A.V. Diurnal and seasonal variations of F2 layer characteristics over Irkutsk during the decrease in solar activity in 2003–2006: Observations and IRI-2001 model predictions // Adv. Space Res. 2009. V. 43, N 11. P. 1806–1811. doi:10.1016/j.asr.2008.09.029.
- Ратовский К.Г., Потехин А.П., Медведев А.В., Куркин В.И. Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности // Солнечно-земная физика. Иркутск, 2004. Вып. 5 (118). С. 102–104.
- Zhang M.-L., Shi J.-K., Wang X., et al. Ionospheric behavior of the F2 peak parameters foF2 and hmF2 at Hainan and comparisons with IRI model predictions // Adv. Space Res. 2007. V. 39. P. 661–667.
- Bilitza D., Obrou O.K., Adeniyi J.O., Oladipo O. Variability of foF2 in the equatorial ionosphere // Adv. Space Res. 2004. V. 34. P. 1901–1906.
- Ким А.Г., Котович Г.В. Расчет f_0F_2 , h_mF_2 в средней точке трассы по экспериментальным данным наклонного зондирования. Сравнение расчетных значений с экспериментальными значениями и с моделью IRI // Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 12. С. 1092–1098.
- Liu H., Stolle C., Watanabe S., Abe T., et al. Evaluation of the IRI model using CHAMP observations in polar and equatorial regions // Adv. Space Res. 2007. V. 39. P. 904–909.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск