

# Сравнительный анализ измерения электронной концентрации во внешней ионосфере

РАТОВСКИЙ К. Г.<sup>1</sup>, ЩЕРБАКОВ А. А.<sup>1</sup>, АЛСАТКИН С. С.<sup>1</sup>, ДМИТРИЕВ А. В.<sup>2,3</sup>,  
СУВОРОВА А. В.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup>МГУ имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>National Central University, 32001, Jhongli City, Taiwan

email: ratovsky@iszf.irk.ru, scherbakov@iszf.irk.ru, alss@iszf.irk.ru,

dalex@jupiter.ss.ncu.edu.tw, suvorova\_alla@yahoo.com

Сравнительный анализ измерения электронной концентрации необходим как для взаимных калибровок различных инструментов, так и для калибровок ионосферных моделей.

В работе проводится сравнение электронной концентрации, полученной на трех различных инструментах: (1) Иркутский радар некогерентного рассеяния [1] (РНР) (52.9 ° с.ш., 103.3 ° в.д.); (2) Иркутский ионозонд вертикального зондирования [2] (52.3 ° с.ш., 104.3 ° в.д.) и (3) спутник COSMIC/FORMOSAT-3 [3], измеряющий профиль электронной концентрации радиозатменным методом во время пролетов вблизи места расположения РНР. Данные инструментов сопоставлялись с Международной справочной моделью ионосферы IRI [4]. Для сравнения были использованы продолжительные непрерывные измерения на РНР (Таблица 1).

Таблица 1. Периоды продолжительных непрерывных измерений на РНР

Период наблюдений	Число дней	Число одновременных измерений	Среднегодовое значение F10.7 (с.е.п.)
05.06-19.06, 2007	15	46	73
25.08-28.09, 2008	35	44	69
01.04-18.04, 2009	16	32	71
12.01-28.02, 2010	48	62	80
16.01-16.02, 2011	32	28	114
12.04-21.04, 2011	10	6	
18.01-05.02, 2012	8	13	120
06.04-22.04, 2012	12	23	
01.01-21.01, 2013	19	49	123
21.06-30.06, 2013	9	24	
25.12-31.12, 2013	4	10	
Всего	208	337	

Для сравнения использовались 4 характеристики профиля электронной концентрации: (1) максимум электронной концентрации NmF2; (2) электронное содержание в нижней (170-300 км) части ионосферы TECb; (3) электронное содержание в верхней (300-600 км) части ионосферы TECt и (4) полное (170-600 км) электронное содержание TEC. При использовании данных ионозонда выше высоты максимума электронной концентрации hmF2, профиль рассчитывался с помощью экстраполяции слоев Чепмена с масштабной высотой, рассчитанной методом Хуанга-Рейниша.

Наиболее часто тестирование метода радиозатменных измерений проводилось для характеристик внутренней ионосферы [5], [6], [7]. Отличительной чертой наших исследова-

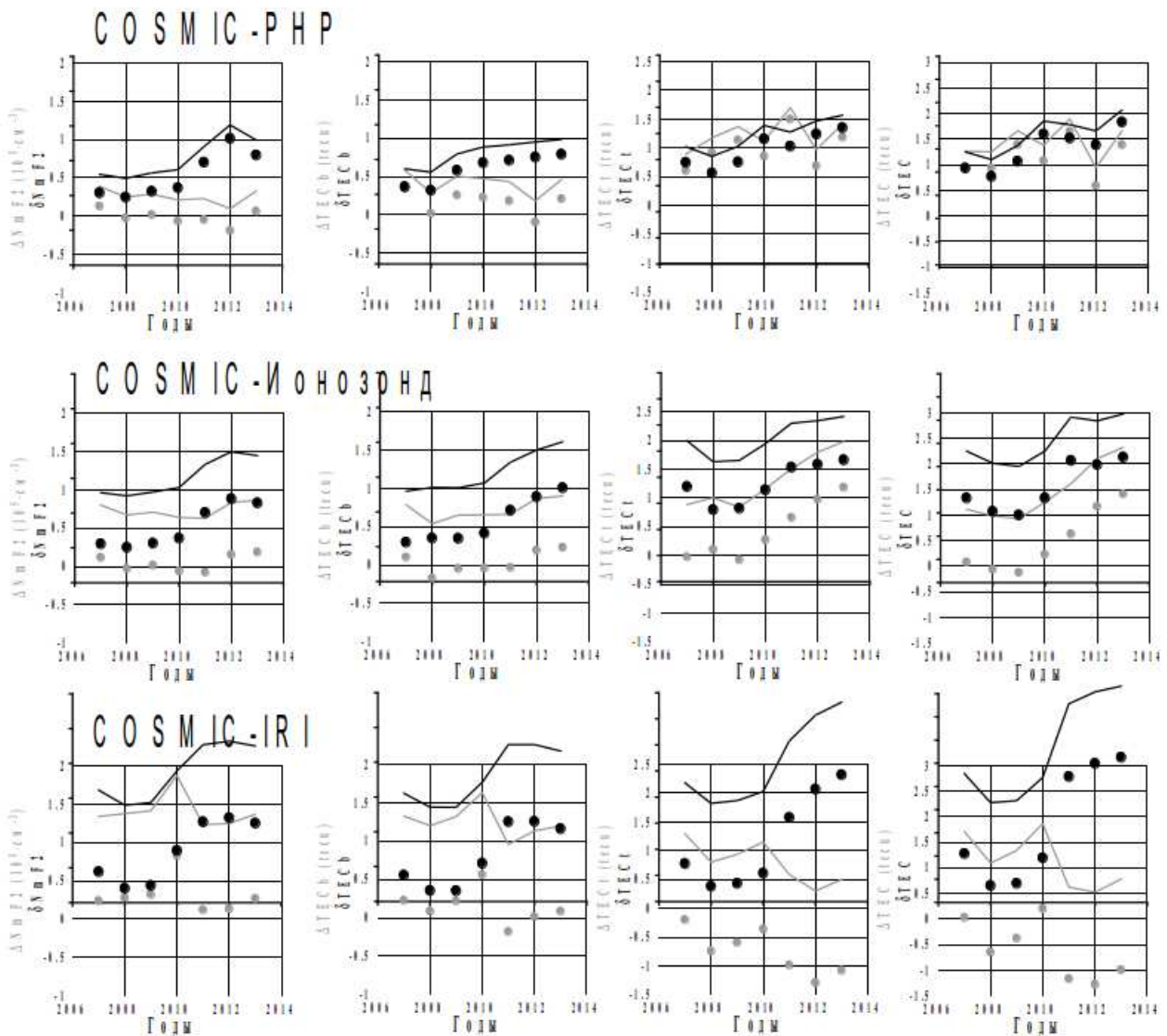


Рис. 1. Среднее ( $\Delta$ , серым) и среднеквадратичное ( $\delta$ , черным) отклонение между данными COSMIC и RHP (вверху); ионозонда (в середине) и модели IRI (внизу). Слева направо показаны результаты сравнения для NmF2; TECb; TECt и TEC.

ний является сопоставление характеристик как внутренней, так и внешней ионосферы в различные сезоны при низкой и умеренной солнечной активности.

Результаты сравнения показаны на Рисунке 1 в виде средних и среднеквадратичных отклонений между данными COSMIC и данными RHP, ионозонда и модели IRI для различных годов. При сопоставлении с RHP было использовано 30-80 сравнений в год, а при сопоставлении с ионозондом и моделью IRI – 700-800 сравнений в год.

Сравнение измерений максимума электронной концентрации NmF2 показывает, что между данными COSMIC и RHP отсутствуют систематические расхождения. Среднеквадратичное отклонение возрастает от  $\sim 0.25 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  при низкой солнечной активности (2007-2010 гг.) до  $\sim 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  при наибольшей солнечной активности для рассматриваемого периода (2012-2013 гг.). Аналогичные результаты показывает сравнение данных COSMIC и Иркутского ионозонда. Полученные значения среднеквадратичного отклонения близки к результатам, полученным при сравнении данных COSMIC и среднеширотных ионозондов:  $\sim 0.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  при сравнении данных ионозонда в Мохе ( $53.5^\circ \text{ с.ш.}, 123.3^\circ \text{ в.д.}$ ) за 2011-2013 гг. [7] и  $\sim 0.2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$  при сравнении данных европейских ионозондов за 2008

г. [6]. По всей видимости, эти результаты означают, что причиной отклонений данных COSMIC от данных РНР и ионозондов являются ошибки измерения радиозатменного метода. Радиозатменный метод (так же как и метод вертикального зондирования) основан на предположении о горизонтальной однородности ионосферы. При этом требования к горизонтальной однородности в случае радиозатменного метода (однородность на масштабах  $\sim 1000$  км) гораздо выше, чем в случае метода вертикального зондирования (однородность на масштабах  $\sim 100$  км). Возрастание среднеквадратичного отклонения с ростом солнечной активности объясняется возрастанием фонового NmF2, и как следствие, возрастанием горизонтальных градиентов электронной концентрации. Отметим, что расхождения между различными методами измерений меньше чем между измерениями и моделью IRI.

Результаты сравнения электронного содержания в нижней части ионосферы TECb в целом близки к результатам сравнения NmF2. Основное различие, заключается в том, что данные COSMIC систематически завышают данные РНР (в отличие от ионозонда) на небольшую величину порядка 0.2 tecu. Причиной различия сравнений COSMIC-РНР и COSMIC-Ионозонд могут являться эффекты экстраполяции профиля электронной концентрации для случаев, когда hmF2 существенно меньше 300 км.

Результаты сравнения электронного содержания в верхней части ионосферы TECt существенно отличаются от результатов сравнения NmF2 и TECb. Во-первых, данные COSMIC систематически завышают данные РНР на заметную величину  $\sim 1$  tecu (от 0.6 tecu в 2007 г. до 1.5 tecu в 2011г.), которая близка к среднеквадратичному отклонению (от 0.6 tecu в 2008 г. до 1.4 tecu в 2013г.). Отметим, что систематическое завышение не имеет отчетливой зависимости от солнечной активности. Во-вторых, сравнение COSMIC-РНР существенно отличается от сравнения COSMIC-Ионозонд, что неудивительно, поскольку данные ионозонда на высотах 300-600 км практически всегда получены методом экстраполяции профиля электронной концентрации. В-третьих, мы не можем сказать, что расхождения между различными методами измерений меньше чем между измерениями и моделью IRI. Данные модели IRI систематически завышают данные COSMIC, которые в свою очередь систематически завышают данные РНР (при этом абсолютная величина систематического расхождения немного меньше в случае COSMIC-IRI). Среднеквадратичное отклонение для COSMIC-РНР меньше чем для COSMIC-IRI при высокой солнечной активности и больше при низкой. Интерпретация результатов сравнения TECt не столь очевидна как в случае NmF2 и TECb. Для выяснения источника систематического различия в данных COSMIC и РНР нами были произведены расчеты профилей мощности рассеянного сигнала на основе ряда профилей электронной концентрации, полученных COSMIC. Расчеты показали, что COSMIC действительно дает завышенную оценку электронного содержания в верхней части ионосферы. Причины того, почему COSMIC систематически завышает электронную концентрацию в верхней ионосфере, не очевидны, можно лишь отметить случаи систематического расхождения при измерениях NmF2 между COSMIC и ионозондами, расположенными на широтах 18-40° [7].

Результаты сравнения полного электронного содержания  $TEC = TECb + TECt$  естественным образом отражают результаты сравнения TECb и TECt. Данные модели IRI систематически завышают данные COSMIC ( $0.6 \pm 1.8$  tecu), которые в свою очередь систематически завышают данные РНР ( $1.1 \pm 1.3$  tecu).

Подводя итог сравнительному анализу измерения электронной концентрации различными методами, мы можем сделать следующие выводы.

В случае сравнения параметров нижней части ионосферы (TECb и NmF2) систематические расхождения отсутствуют либо малы, а среднеквадратичные отклонения могут быть объяснены ошибками измерения радиозатменного метода. Эти ошибки увеличиваются с ростом солнечной активности.

В случае сравнения параметров верхней части ионосферы (TEC<sub>t</sub> и TEC) выявлены систематические расхождения. Данные COSMIC превышают данные РНР на ~1 тесу, причем превышение не имеет отчетливой зависимости от солнечной активности. Расчеты профилей мощности сигнала некогерентного рассеяния на основе ряда профилей электронной концентрации, полученных COSMIC, показали, что COSMIC действительно дает завышенную оценку электронного содержания в верхней части ионосферы. Причины систематических расхождений не очевидны, можно лишь отметить случаи систематического расхождения при измерениях NmF2 между COSMIC и ионозондами, расположенными на широтах 18-40° [7].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ ННС Тайваня в рамках совместного научного проекта № 14-05-92002 ННС\_a / NSC103-2923-M-006-002-MY3.

#### Литература

1. Потехин А.П., Медведев А.В., Заворин А.В., Кушнарев Д.С., Лебедев В.П., Шпынев Б.Г. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния // Космические исследования. – 2008. – Т. 46. – № 4. – С. 356-362.
2. Reinisch B.W., Haines D.M., Bibl K., Galkin I., Huang X., Kitrosser D.F., Sales G.S., Scali J.L. Ionospheric sounding support of OTH radar // Radio Science. – 1997. – V. 32. – No 4. – P. 1681-1694.
3. Tsai L.C., Tsai W.H., Schreiner W.S., Berkey F.T., Liu J.Y. Comparisons of GPS/MET retrieved ionospheric electron density and ground based ionosonde data // Earth Planets Space. – 2001. – V. 53. – No 3. – P. 193-205.
4. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., Richards P., McKinnell L.-A., Reinisch B. The International Reference Ionosphere 2012 - a model of international collaboration // Journal of Space Weather and Space Climate. – 2014. – V. 4. – No A07. – P. 1-12.
5. Cherniak Iu.V., Zakharenkova I.E. Validation of FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation electron density profiles by incoherent scatter radar data // Advances in Space Research. – 2014. – V. 53. – No 9. – P. 1304-1312.
6. Krankowski A., Zakharenkova I., Krypiak-Gregorczyk A., Shagimuratov I.I., Wielgosz P. Ionospheric electron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC over the European region and validated by ionosonde data // Journal of Geodesy. – 2011. – V. 85. – No 12. – P. 949-964.
7. Hu L., Ning B., Liu L., Zhao B., Li G., Wu B., Huang Z., Hao X., Chang S., Wu Z. Validation of COSMIC ionospheric peak parameters by the measurements of an ionosonde chain in China // Annales Geophysicae. – 2014. – V. 32. – No 10. – P. 1311-1319.