

УДК 551.510.535

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕКОНСТРУКЦИИ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ И ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ

С.А. Калашникова, Е.С. Андреева, В.Е. Куницын, И.А. Нестеров

COMPARISON OF THE RESULTS OF TOTAL ELECTRON CONTENT RECONSTRUCTION FROM HIGH AND LOW-ORBITAL SATELLITE DATA

S.A. Kalashnikova, E.S. Andreeva, V.E. Kunitsyn, I.A. Nesterov

Представлены результаты сопоставления глобальных карт вертикального полного электронного содержания ионосферы (VTEC) сети IGS с результатами низкоорбитальной радиотомографии (НОРТ) для различных геофизических условий. В спокойные периоды наблюдаются более высокие значения VTEC сети IGS по сравнению с результатами НОРТ, что обусловлено вкладом плазмосферы. В периоды бурь данные VTEC сети IGS, как правило, сильно расходятся с данными VTEC по НОРТ. Использовать данные глобальных ионосферных карт для геофизических приложений следует с большой осторожностью.

We present the comparison of global ionospheric maps of total electron content obtained on IGS network with the results of low-orbital radiotomography for various geophysical conditions. In non-disturbed periods we observed greater TEC values from IGS network compared with the results of low-orbital radiotomography reconstructions, that could be explained by the influence of plasmasphere. In disturbed periods TEC obtained from global ionospheric maps (GIM) differs greatly from the one obtained from low-orbital radiotomography, thus in such conditions GIMs should be used carefully for geophysical applications.

Исследование структуры ионосферы важно как для понимания физики протекающих в ней процессов, так и для разнообразных радиофизических задач, связанных с распространением радиоволн, поскольку ионосфера существенным образом влияет на работу различных систем навигации, локации и связи. Основной характеристикой ионизированной атмосферы является величина полного электронного содержания в единичном атмосферном столбе TEC – Total Electron Content; она пропорциональна фазе принимаемого сигнала с точностью до константы. Для решения задачи мониторинга ионосферы можно использовать как фазовые измерения, так и измерения по псевдодалностям.

С начала 90-х гг. для исследования структуры ионосферы успешно применяется низкоорбитальная (НО) спутниковая радиотомография (РТ), позволяющая восстановить двумерные сечения электронной плотности в ионосфере по данным спутникового радиопросвечивания волнами УКВ-диапазона [1]. Результаты НОРТ многократно сопоставлялись с данными ионозондов и радаров некогерентного рассеяния, в том числе и в периоды ионосферных бурь [2, 3]. Пространственное разрешение НОРТ составляет 20–30 км по горизонтали и 30–40 км по вертикали, и локальная точность восстановления структуры ионосферы для НОРТ не хуже 10–15 % (интегральная точность 5–10 %).

С развертыванием высокоорбитальных (ВО) навигационных систем GPS и ГЛОНАСС появился новый инструмент, который позволяет непрерывно проводить измерения характеристик проходящих через ионосферу радиосигналов. В настоящее время разработаны варианты РТ ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем типа GPS/ГЛОНАСС [1, 4]. В последние годы активно используются глобальные ионосферные карты (Global Ionospheric Maps – GIM) вертикального полного электронного содержания (VTEC), сгенерированные на базе данных всемирной сети GPS-приемников. Глобальные VTEC-карты с временным

разрешением 2 ч предоставляются Международной GPS-службой (IGS) в стандартном формате IONEX. Пространственное разрешение глобальных VTEC-карт составляет 5° по долготе и 2.5° по широте [5]. Различные методы, применяемые разными научными GIM-группами для реконструкции абсолютного VTEC, основываются на общей идее подбора параметров выбранной модели вертикального распределения электронной плотности ($N(h)$ -профилей). Однако такое представление структуры ионосферы с помощью параметров $N(h)$ -профилей дает разные решения при различном выборе ионосферных параметров. Кроме того, в возмущенные периоды в ионосфере и плазмосфере могут присутствовать сильные неоднородности, которые нельзя представить набором небольшого числа параметров $N(h)$ -профилей.

Цель данной работы – проведение сравнения глобальных VTEC-карт с результатами НОРТ. По данным НОРТ-систем в России (Москва–Шпицберген) и районе Аляски были получены РТ-реконструкции ионосферы, по которым затем вычислялись значения VTEC. Так как глобальные ионосферные карты TEC обладают сильным пространственным усреднением и большим (двухчасовым) временным интервалом, а процессы в ионосфере протекают существенно быстрее, то данные, полученные при временной интерполяции GIM, могут не отражать текущее состояние ионосферы. В связи с этим для сопоставления отбирались НОРТ-реконструкции, отстоящие от глобальных ионосферных карт с наименьшим временным интервалом (в пределах 30 мин). Ниже представлены результаты сопоставления глобальных VTEC-карт с результатами НОРТ как в спокойные дни, так и в периоды геомагнитных бурь в октябре 2003 г., июле и ноябре 2004 г.

На рис. 1 показан типичный пример сопоставления VTEC по данным НОРТ с VTEC для разных GIM в невозмущенный период 07.11.2003 в районе Аляски. Видно, что ход кривых совпадает, однако VTEC по данным НОРТ существенно меньше VTEC по данным GIM, что можно объяснить вкладом плазмосферы.

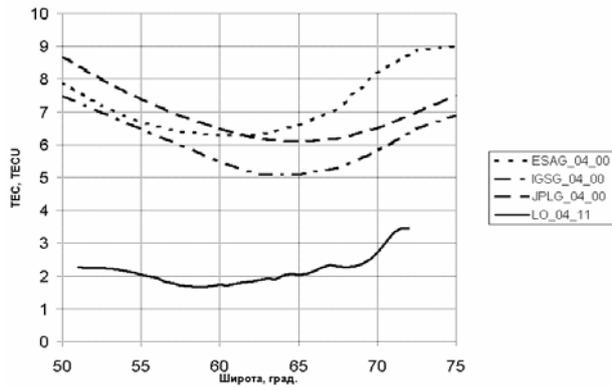


Рис. 1. Графики изменений VTEC по данным НОРТ (LO_04_11) и GIM-групп (ESA, IGS, JPL) в невозмущенный период 07.11.2004 г. в 04:00 UT ($K_p=3$), Аляска.

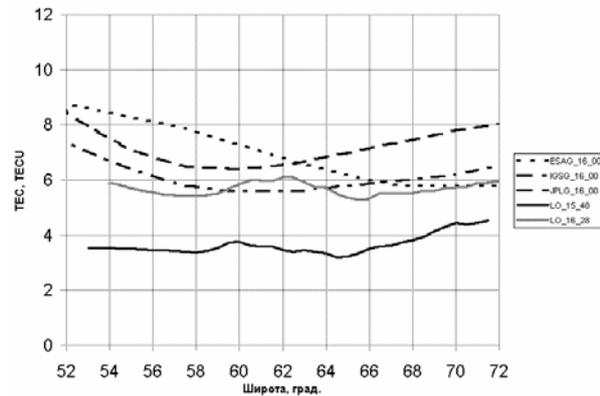


Рис. 2. Графики изменений VTEC по данным НОРТ (LO_15_48, LO_16_28) и GIM-групп (COD, ESA, IGS, JPL, UPC) в невозмущенный период 26.10.2003 г. в 16:00 UT ($K_p=1.2$), Аляска.

Электронная концентрация в плазмосфере на 2–3 порядка меньше электронной концентрации ионосферы. Однако существенная часть луча спутник–приемник для ВО спутниковых систем приходится именно на плазмосферу, что и может давать сопоставимый вклад в значение VTEC. На рис. 2 наблюдается аналогичная ситуация, однако видны большие расхождения между данными различных GIM-групп и НОРТ, а также лучшая детализация последних.

Во время геомагнитных бурь возможно обратное явление: значения VTEC, полученные различными GIM-группами, могут быть в 3–4 раза меньше значений VTEC, вычисленных по НОРТ-сечениям ионосферы (рис. 3, 4). Глобальные VTEC-карты сильно сглажены и имеют более грубое пространственное разрешение, чем данные НОРТ-сечений, и, следовательно, не могут отражать сложные быстрые процессы перестройки ионосферы на масштабах менее 200 км и 2 ч, которые происходят во время гелиогеомагнитных возмущений. Особый интерес вызывает рис. 3, где показаны две последовательные НОРТ-реконструкции TEC, полученные с интервалом в полчаса во время сильнейшей магнитной бури 29.10.2003. Хорошо видно, как сильно меняется структура ионосферы за столь короткий промежуток времени. Максимальные значения VTEC, полученные по данным НОРТ, составляют 70–75 TECU и в 3–6 раз превышают соответствующие значения по данным GIM. Такие значения электронной концент-

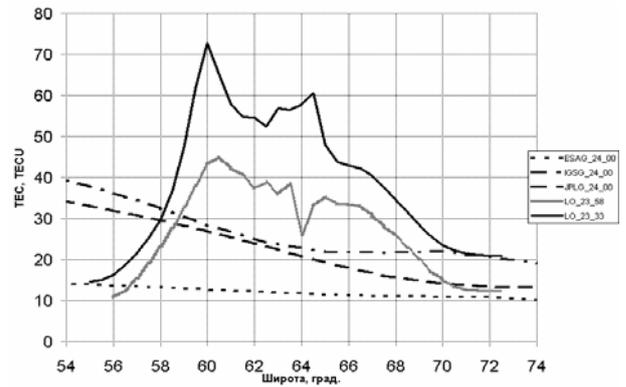


Рис. 3. Графики изменений VTEC по данным НОРТ (LO_23_33, LO_23_58) и GIM-групп (ESA, IGS, JPL) в период магнитной бури 30.10.2003 г. в 00:00 UT ($K_p=8.7$), Аляска.

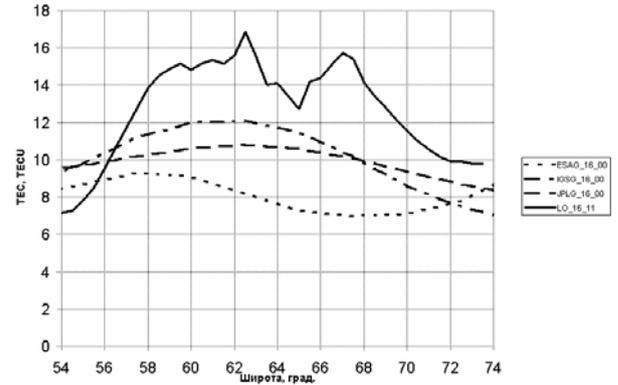


Рис. 4. Графики изменений VTEC по данным НОРТ (LO_16_11) и GIM-групп (COD, ESA, IGS, JPL, UPC) в период магнитной бури 29.10.2003 г. в 16:00 UT ($K_p=8.3$), Аляска.

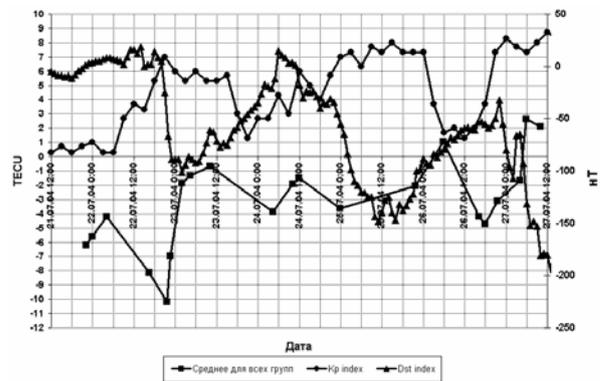


Рис. 5. Графики изменений индексов K_p , D_{st} и средних отклонений VTEC, рассчитанных по картам GIM, от VTEC по данным НОРТ за период с 21 по 27 июля 2004 г.

рации характерны не для района Аляски, а для экваториальных областей в дневное время в невозмущенный период.

На рис. 5 приведены графики изменений геомагнитных индексов K_p и D_{st} , а также средних отклонений данных VTEC для GIM от VTEC, вычисленных по НОРТ-сечениям. Как видно из рисунка, в спокойные периоды наблюдаются более высокие значения VTEC для GIM по сравнению с НОРТ, что можно объяснить вкладом плазмосферы. Однако в периоды бурь результаты GIM, как правило, сильно отличаются (иногда в разы) от VTEC, полученного НОРТ-подходом. Отсюда следует, что применять данные GIM для возмущенных периодов и получать

на этой основе геофизические результаты следует с большой осторожностью.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 05-05-65145, № 07-05-01120).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Наука, 2007.
2. Foster J.C., Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. et al. Russian-American tomography experiment // *Int. J. Imaging Syst. Technol.*, 1994. V. 5. P. 148–159.
3. Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images // *Radio Sci.* 2003. V. 38, N 1. P. 1011, doi:10.1029/2002RS002657,
4. Куницын В.Е., Андреева Е.С., Кожарин М.А., Нестеров И. А. Радиотомография ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем // *Вестник МГУ. Физика.* 2005. № 1. С. 74–84.
5. Mannucci A.J. Wilson B.D., et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33, N 3. P. 565–582.

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