

Исследование высокоширотной ионосферы по данным УФ-спектрометрии, глобальным ионосферным картам GIM и высокоорбитальной радиотомографии

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

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет
119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2
E-mail: kalashnikova@mocent.ru*

В данной работе представлены результаты исследования структуры высокоширотной ионосферы по данным УФ-спектрометра GUVI и сопоставления их с данными глобальных ионосферных карт и результатам высокоорбитальной спутниковой радиотомографии в периоды различных геомагнитных условий в 2003–2007 гг. Полученные результаты показывают, что пространственное разрешение глобальных ионосферных карт не соответствует заявленному. Различные авроральные неоднородности и волновые структуры ионосферы, достигающие размеров $10\text{--}15^\circ$, а также главный ионосферный провал, отчетливо различаемые в данных УФ-спектрометрии и ВОРТ, могут отсутствовать в данных GIM. Это говорит о необходимости с аккуратностью использовать последние для исследования структуры ионосферы, особенно в условиях повышенной геомагнитной активности.

Ключевые слова: ионосфера, радиотомография ионосферы, полное электронное содержание, TEC, GIM, УФ-спектрометрия, GUVI.

1. Введение

Возможность использовать ультрафиолетовые и видимые эмиссии ночного неба для исследования распределений электронов и ионов O^+ F области ионосферы была обнаружена в 1960–70-е годы (Meier, 1991). Интенсивность свечения в первом приближении оказывается пропорциональной интегралу от квадрата плотности электронной концентрации. В настоящее время одним из инструментов, позволяющих проводить такие исследования, является УФ-спектрометр пространственного сканирования GUVI, расположенный на спутнике TIMED. Сканирование производится в дальнем ультрафиолетовом диапазоне и позволяет получать изображения от горизонта до горизонта для пяти различных заданных интервалов длин волн (Paxton et al., 1999).

Для определения значений полного электронного содержания ионосферы (Total electron content – TEC) с начала 1990-х гг. успешно используются результаты спутниковой высокоорбитальной радиотомографии (ВОРТ), метода, основанного на применении навигационных спутниковых систем, таких как GPS/GLONASS, и двумерных сетей наземных приемников (Куницын и др., 2007). Другим весьма распространенным методом исследования электронной концентрации ионосферы является технология Global Ionospheric Maps (GIM), которая обеспечивает построение глобальных карт абсолютного вертикального значения TEC (VTEC) путем интерполяции данных, получаемых на мировой сети приемников GPS (Manuchi et al., 2005). Поскольку задача исследования структуры ионосферы является актуальной проблемой, становится необходимым проанализировать также границы

применимости методов, предназначенных для решения этой задачи, и определить размеры структур ионосферы, различаемых каждым из них.

2. Источники данных

Радиотомография ионосферы позволяет восстанавливать пространственную структуру распределения электронной концентрации среды (Куницын и др., 2007). Измерения приведенной фазы сигнала со спутника, регистрируемой наземным приемником, являются входными данными для РТ реконструкции. Приведенная фаза φ (с точностью до неизвестной начальной фазы φ_0) пропорциональна интегралу от электронной концентрации n_e :

$$\lambda r_e \int n_e d\sigma = \varphi + \varphi_0,$$

где λ – длина зондирующей волны, r_e – классический радиус электрона.

Существующие высокоорбитальные навигационные спутниковые системы, такие как GPS/GLONASS и двумерные сети наземных приемников, позволяют решать задачу 4D РТ (3 пространственные координаты и время) (Nesterov, Kunitsyn, 2011). ВОРТ позволяет получать глобальное и региональное распределение электронной концентрации ионосферы с горизонтальным разрешением порядка 30 км и временным интервалом 30 минут. По полученным значениям электронной концентрации впоследствии можно определить значения вертикального TEC (VTEC).

В работе также были использованы данные GIM, представляющие собой одно из крупных направлений в применении GPS для зондирования околоземного космического пространства и обеспечения эффективности функционирования спутниковых радиотехнических систем (Ho et al., 1997). Чтобы сопоставить TEC и конкретную точку пространства, методика GIM рассматривает ионосферу как сферический слой нулевой толщины, расположенный на фиксированной высоте. При этом считается, что TEC, измеренное вдоль луча «приемник-ИСЗ», определяется вкладом подионосферной точки. Пространственное разрешение GIM составляет $2,5^\circ$ по широте и 5° по долготе, временной интервал составляет 2 часа.

Для получения дополнительной информации о состоянии ночной ионосферы были использованы данные УФ-спектрометра пространственного сканирования GUVI, расположенного на спутнике TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) (Dymond et al., 1997). Спутник имеет полярную солнечно-синхронную орбиту на высоте ~ 625 км. Сканирование производится в дальнем ультрафиолетовом диапазоне и позволяет получать изображения от горизонта до горизонта для пяти различных заданных интервалов длин волн: линия H + 1216 Å, линии O + 1304 Å и 1356 Å, и два интервала N2 Лаймана–Бриджа–Хопфилда 1400–1500 Å и 1650–1800 Å. Получаемые значения интенсивности свечения в ночное время в первом приближении пропорциональны интегралу от квадрата плотности электронной концентрации (Paxton et al., 1999; Dymond et al., 1997; DeMajistre et al., 2004):

$$I(\varphi) \sim \alpha \int_0^{\infty} n_e^2(z(s)) ds ,$$

где n_e – электронная плотность на высоте z , s – длина пути от обозревателя, α – коэффициент скорости излучающей рекомбинации. Пространственное разрешение данных составляет 100 км, таким образом, данные GUVI позволяют качественно оценивать состояние ионосферы, определяя с достаточной точностью неоднородности среды.

3. Сопоставления GIM с результатами BORT и данными GUVI

По данным GUVI были исследованы крупномасштабные ночные авроральные свечения и сопоставлены с оценками VTEC по данным GIM и BORT. Сопоставления проводились в периоды различной геомагнитной активности в 2003–2008 гг. Авроральные свечения, имеющие значительные размеры, отчетливо видны на графике, построенном по данным GUVI (версия 3) для 05.04.2006 09:40–10:01 UT (*рис. 1а*). Значения VTEC по данным BORT также имеют хорошо заметные максимумы в области аврорального овала (*рис. 1б*). В то же время GIM (для примера показаны данные IGS) не могут отобразить структуру ионосферы – узкая протяженная область повышенной ионизации в авроральных широтах отсутствует (*рис. 1в*). Наблюдается лишь плавное возрастание значений VTEC вплоть до 85° с. ш., что может быть вызвано усреднением по всей авроральной зоне электронной концентрации, увеличенной за счет конвекции с дневной стороны, а так же возможными неточностями в решении задачи на границах области. Провал значений VTEC в области 70–75° с. ш. в данных GIM полностью отсутствует. Границы провала ионизации, отчетливо различаемого по данным BORT в области 60° с. ш. 150° з. д. – 50° с. ш. 70° з. д., гораздо менее четкие и более усредненные на данных GIM.

Сопоставление данных для 08.04.2006 14:00 UT показано на *рис. 2*. Увеличенная интенсивность свечения на широтах ~75° хорошо заметна на *рис. 2а*, полученном по данным GUVI (версия 3). В этой же авроральной области отмечается рост значений VTEC по данным BORT (*рис. 2б*). При этом оба типа данных хорошо отражают волновую структуру и размер неоднородностей. Данные GIM (группа IGS) (*рис. 2в*) показывают сглаженные значения VTEC, несколько большие по сравнению с данными BORT, не различая узкой, однако достаточно протяженной по долготе, области повышенной ионизации. Таким образом, можно отметить, что BORT в отличие от GIM позволяет различить структуры, имеющие размеры, не превышающие 2–3°. Кроме того, в данном примере снова вызывает сомнения плавное увеличение значений VTEC с ростом широты, вплоть до полярных областей, что говорит о возможном существовании в рассматриваемых методах ошибок определения значений на границах.

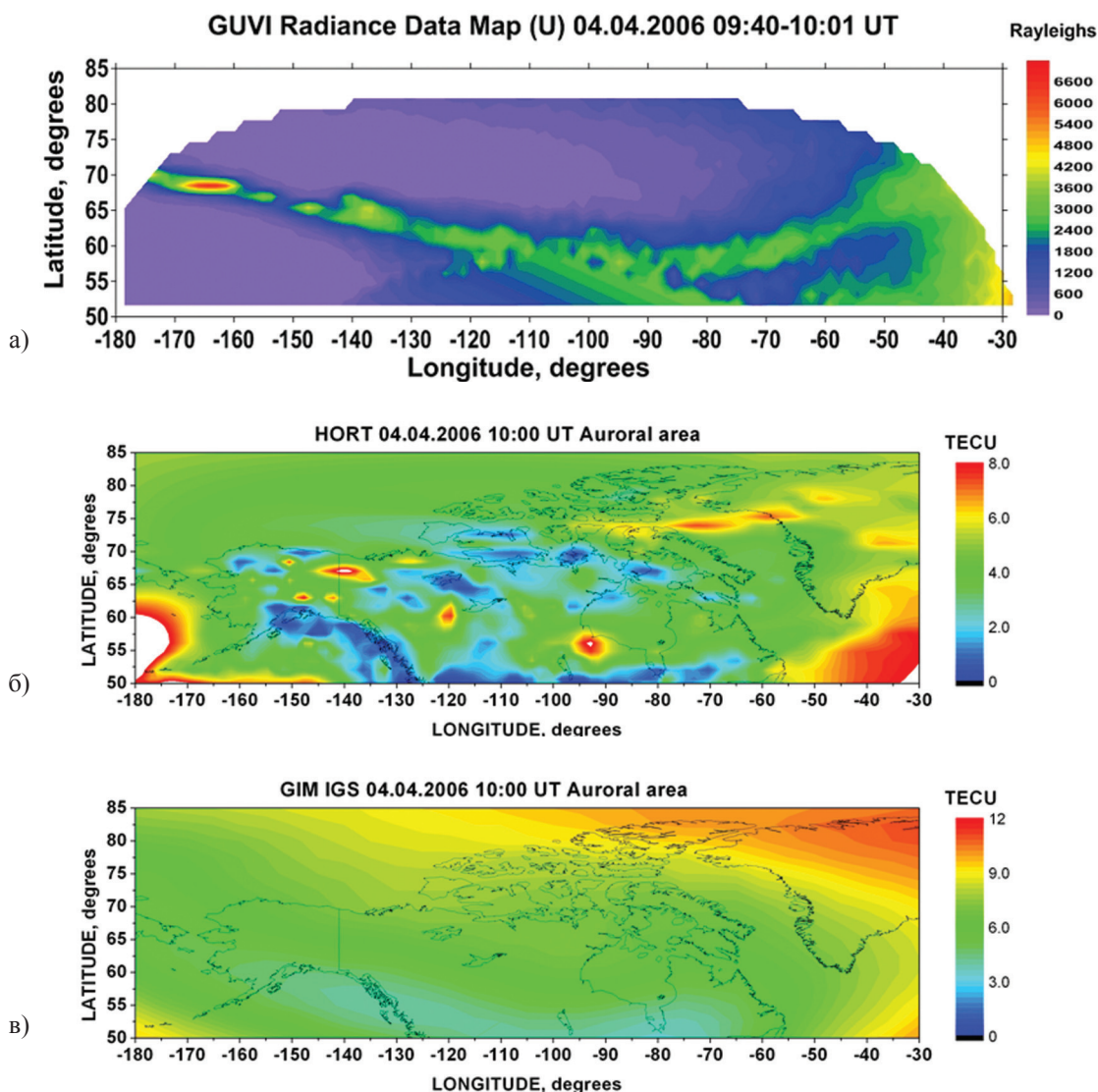


Рис. 1. Интенсивность свечения по данным GUVI (версия 3):
 а – 04.04.2006 в 09:40-10:01 UT; значения вертикального TEC
 по результатам BOPT (б) и GIM (группа IGS) (в)
 в период спокойных геомагнитных условий
 04.04.2006 в 10:00 UT ($K_p = 2$, $Dst = 3$, $A_p = 7,5$)

Еще один пример отсутствия областей повышенной электронной концентрации по данным GIM показан на рис. 3. На рис. 3а четко выделяется неоднородная область увеличенной светимости на широтах 60–70°. По данным BOPT в этом же регионе можно различить группу локальных максимумов значений VTEC как на карте для 21:00 UT, так и на карте для 22:00 UT (рис 3б). Ниже области максимумов на обеих картах располагается главный ионосферный провал, имеющий достаточно четкие границы. Можно отметить смещение рассматриваемых неоднородностей с течением времени на запад, вызванное вращением Земли. Данные GIM для указанного временного интервала показаны на рис. 3в. В рассматриваемой области увеличение электронной концентрации выражено неявно, полностью отсутствуют локальные максимумы, отмеченные как на данных GUVI, так и по результатам BOPT. Главный ионосферный провал виден на карте GIM, построенной для 22:00 UT, однако с гораздо менее четкими границами и меньшим градиентом.

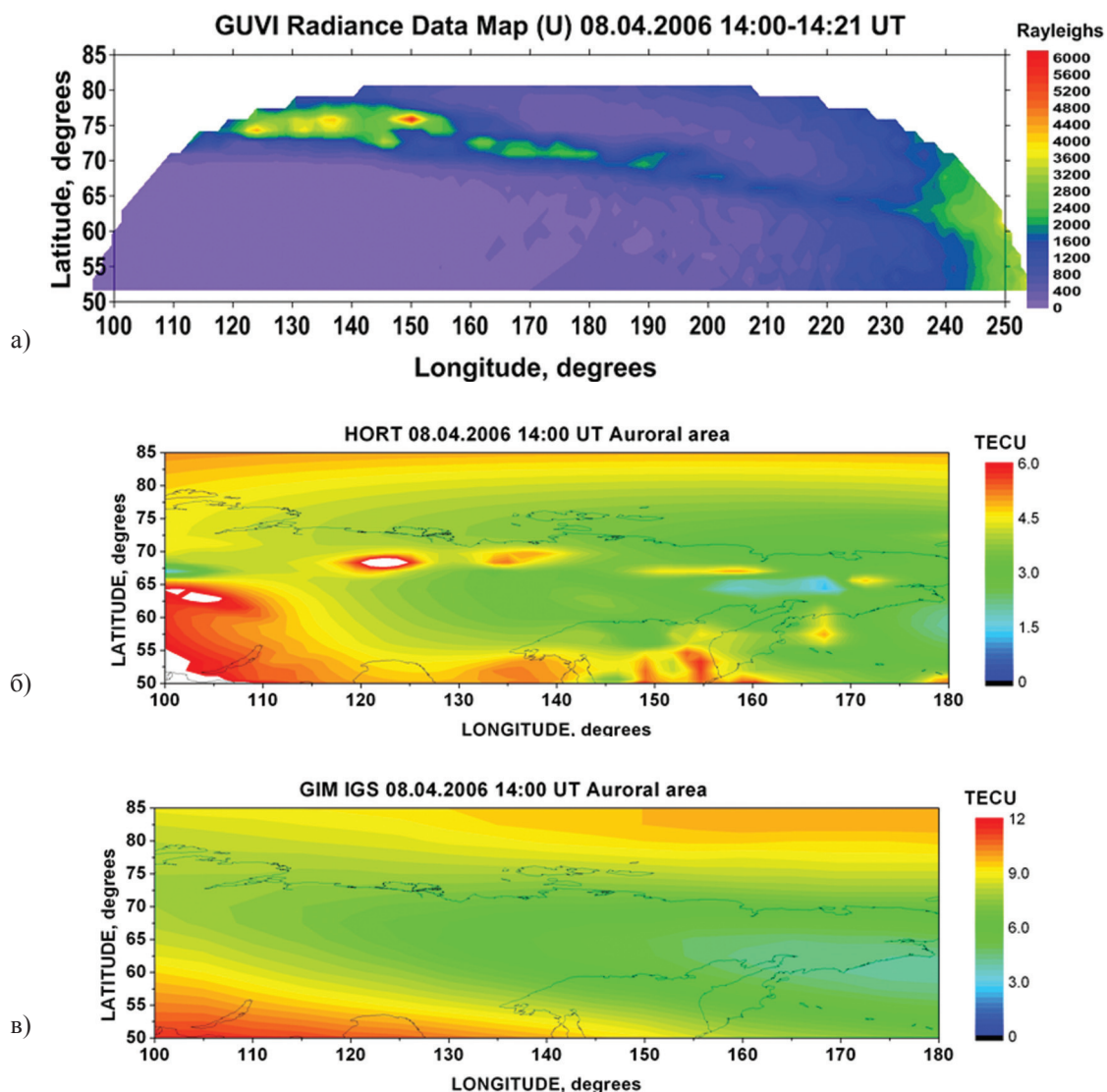
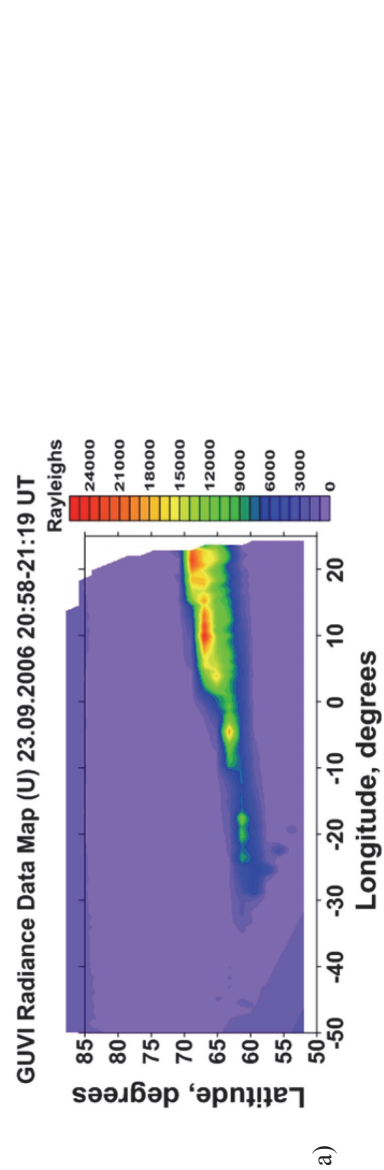


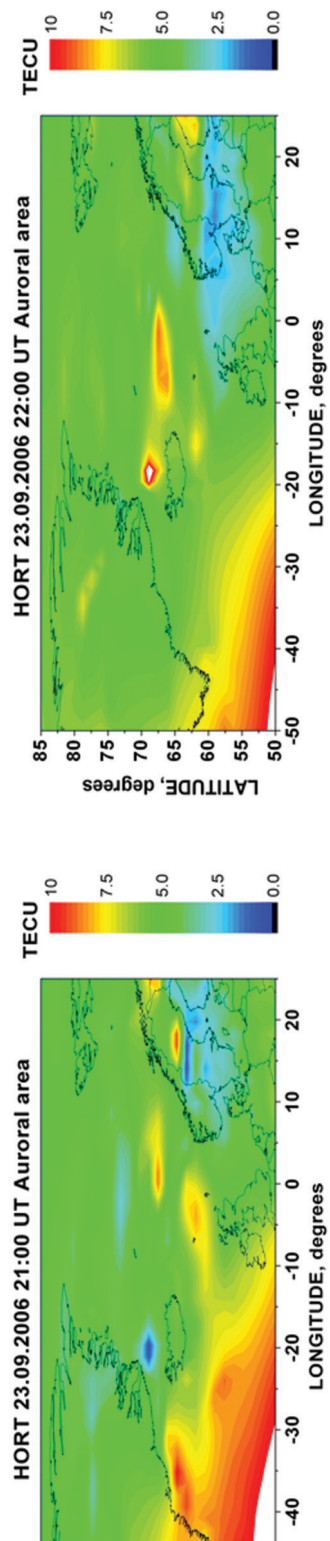
Рис. 2. Интенсивность свечения по данным GUVI (версия 3):
 а – 08.04.2006 в 14:00-14:21 UT; значения вертикального TEC
 по результатам ВОРТ (б) и GIM (группа IGS) (в)
 в период начала бури 08.04.2006 в 14:00 UT
 ($K_p = 1$, $Dst = -10$, $A_p = 4$)

Таким образом, можно отметить, что ВОРТ дает возможность для более детального исследования структуры ионосферы, несмотря на регулярно заниженные по сравнению с данными GIM значения VTEC.

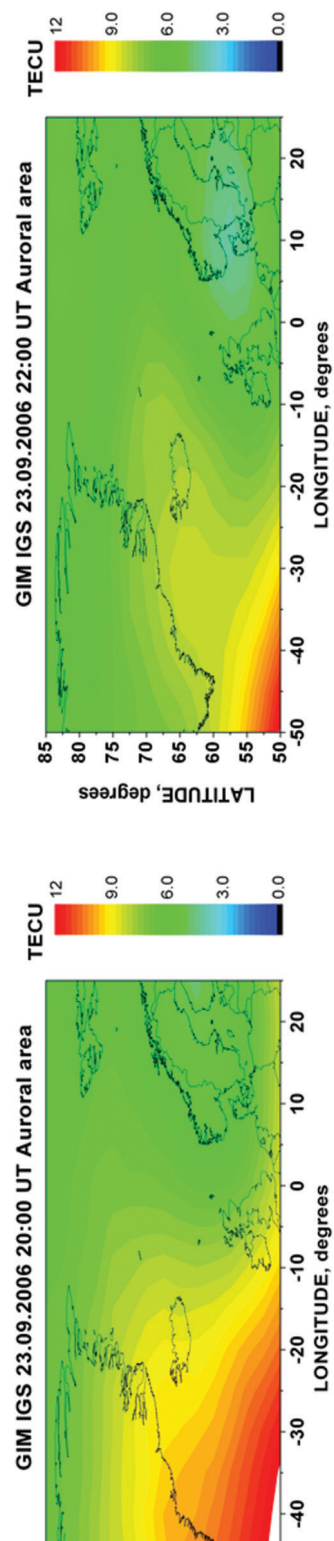
Еще один пример частичного восстановления ГИП представлен на рис. 4. На данных GUVI хорошо видна нижняя граница авроры в области от -170° з. д. 60° с. ш. до -130° з. д. до 50° с. ш., что хорошо коррелирует с верхней границей ГИП по данным ВОРТ (рис. 4б). По данным GIM (рис. 4в) верхняя граница провала смещена примерно на 20° по долготе на восток и начинается лишь на 150° з. д. В западной области ($170-160^\circ$ з. д.), напротив, отмечается существенное увеличение электронной концентрации. Кроме того, в отличие от данных GIM, по данным ВОРТ можно различить и неоднородную структуру авроры – наличие локального минимума в области $-140-130^\circ$ з. д. $60-65^\circ$ с. ш.



a)



б)



в)

Рис. 3. Интенсивность свечения по данным GUVI (версия 3): а – (21.09.2006 в 20:58-21:19 UT; значения вертикального TEC по результатам ВОРТ (б) и GIM (группа IGS) (в) в возмущенный период 23.09.2006 в 20:00–22:00 UT ($K_p = 5$, $Dst = 3$, $A_p = 48$))

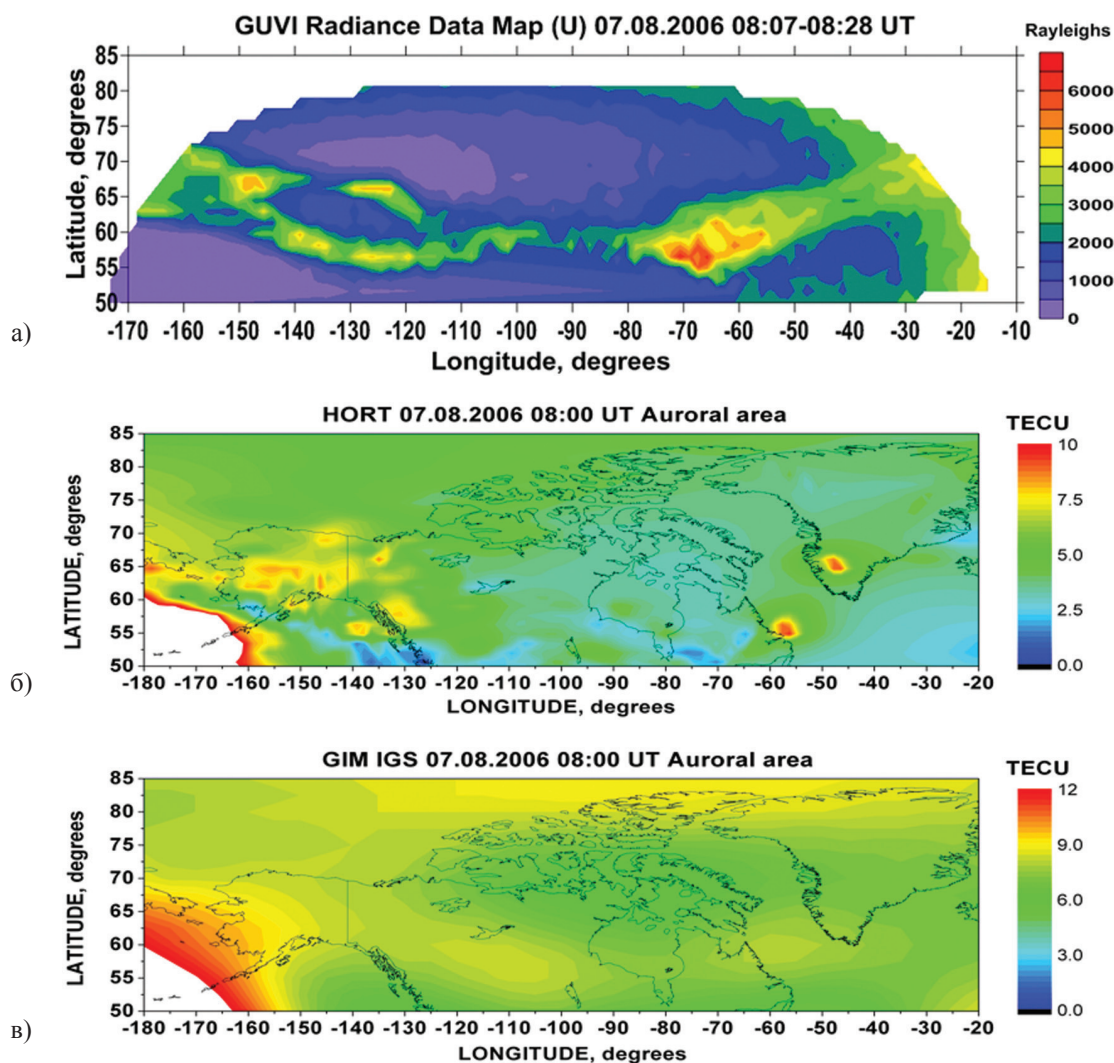


Рис. 4. Интенсивность свечения по данным GUVI (версия 3):
 а – 21.09.2006 в 20:58–21:19 UT; значения вертикального TEC
 по результатам ВОРТ (б) и GIM (группа IGS) (в) в возмущенный период
 23.09.2006 в 20:00–22:00 UT ($K_p = 5$, $Dst = 3$, $A_p = 48$)

4. Выводы

Проведенный анализ показал, что широтное пространственное разрешение GIM существенно хуже заявленных $2,5^\circ$, особенно в периоды повышенной солнечной активности. Значения VTEC по данным GIM сильно сглажены по сравнению с результатами ВОРТ, они не могут отражать сложные быстрые процессы перестройки ионосферы на масштабах менее 200 км и 2 часов, которые происходят в периоды авроральных свечений и во время геомагнитных бурь. На картах GIM нередко не проявляются структуры с размерами 5° и более – могут отсутствовать или быть недостаточно четко определены такие структуры, как главный ионосферный провал и области повышенной ионизации в авроральной зоне. При этом подобные структуры с размерами порядка 2° и менее регистрируются методом ВОРТ и хорошо видны в данных УФ-свечения. Отсюда следует, что применять GIM, в особенности для возмущенных периодов, и получать на этой основе геофизические результаты следует с большой осторожностью.

Благодарности

Авторы выражают благодарность The Aerospace Corporation и The Johns Hopkins University за данные GUVI, использованные для анализа состояния ионосферы и взятые на сайте http://guvi.jhuapl.edu/guvi_home.html. Также благодарим Международную службу глобальных навигационных спутниковых систем (International GNSS Service, IGS) за данные GPS, использованные в работе.

Литература

1. *Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Изд-во ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАН, ISBN 5-98277-033-7, 2006. С. 68–79.
2. *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. М.: Наука. 2007. С. 277–294.
3. *DeMajistre R., Paxton, L. J., Morrison, D., et al.* Retrievals of nighttime electron density from Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission Global Ultraviolet Imager (GUVI) measurements // *Journal of Geophysical Researches*. 109, A05305, doi:10.1029/2003JA010296, 2004.
4. *Dymond K.F., Thonnard S.E., McCoy R.P. and Thomas R.J.* An optical remote sensing technique for determining nighttime F region electron density // *Radio Science*. 1997. V. 32. No. 5. P. 1985–1996.
5. *Ho C.M., Wilson B.D., Mannucci A.J. et al.* A comparative study of ionospheric total electron content measurements using global ionospheric maps of GPS, TOPEX radar, and the Bent model // *Radio Science*. 1997. V. 32. No. 4. P. 1499–1512.
6. *Mannucci A.J., Wilson B.D. et al.* A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Science*. 1998. V. 33 (3). P. 565–582.
7. *Meier R.R.* Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere *Space Science Review*. 1991. V. 58. Iss. 1. P. 1–185.
8. *Nesterov I.A., Kunitsyn V.E.* GNSS radio tomography of the ionosphere: The problem with essentially incomplete data // *Advances in Space Research*. 2011. V. 47. Iss. 10. P. 1789–1803.
9. *Paxton L.J., Humm D.C., Christensen A.B. et al.* Global ultraviolet imager (GUVI): measuring composition and energy inputs for the NASA Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission // *SPIE Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III*. 1999. V. 3756. P. 265–276.

Studying high-latitude ionosphere using UV-spectrometry, Global Ionospheric Maps and high-orbital radiotomography

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

M.V. Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics

Leninskie Gory, Moscow 119991

E-mail: kalashnikova@mocent.ru

In this work we present the results of the studies of high-latitude ionosphere using data of GUVI ultraviolet spectrometer instrument, Global Ionospheric Maps and high-orbital radiotomography. We present comparison of the results obtained using these techniques for various geomagnetic conditions in the years 2003-2007. Our results show that spatial resolution of Global Ionospheric Maps is weaker than it is stated. Various ionospheric irregularities and wave structures with spatial dimensions of 10-15° which are distinctly observed in GUVI data and tomographic reconstructions may not be present on Global Ionospheric Maps. These circumstances should be taken into account while using GIMs for ionospheric studies, especially in disturbed geomagnetic conditions.

Keywords: ionosphere, radiotomography of the ionosphere, TEC, GIM, UV-spectrometry, GUVI.