

Ионосфера над Аляской в период октябрьской бури 2003 г.: радиотомография и данные ионосферных моделей GAIM/IFM

Е. С. Андреева^{1а}, В. Е. Куницын¹, Е. А. Леонтьева¹, Ю. Н. Федюнин^{1,2б}

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы. 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2. ²Академия торгового морского флота. США, Нью-Йорк 11021. E-mail: ^аes_andreeva@mail.ru, ^бjedyuniny@usmta.edu

Представлены результаты сравнительного анализа данных двух ионосферных моделей GAIM и IFM с радиотомографическими сечениями ионосферы и с ионозондовыми измерениями в районе Аляски в период магнитной бури в конце октября 2003 г. Результаты проведенных сопоставлений (64 сечения) показали, что модель GAIM существенно ближе к радиотомографическим реконструкциям, нежели модель IFM, однако с ростом возмущенности ионосферы отличие GAIM от радиотомографии заметно возрастает.

PACS: 94.20.-y, 94.30.Lg.

Ключевые слова: ионосфера, радиотомография, электронная плотность, неоднородности ионосферной плазмы, провал, магнитные бури.

Статья поступила 06.05.2008, подписана в печать 16.05.2008.

Введение

На протяжении последних 15 лет активно развиваются методы ионосферной спутниковой радиотомографии (РТ) на базе низкоорбитальных навигационных спутников, позволяющие восстанавливать двумерные высотно-широтные распределения электронной плотности в плоскости пролета спутника на расстояниях порядка нескольких тысяч километров за 10–15 мин. Горизонтальное разрешение РТ-сечений ионосферы составляет 20–30 км, вертикальное 30–40 км. В 1990 г. были получены первые РТ-реконструкции ионосферы [1], и с тех пор проведены многочисленные РТ-исследования ионосферы от приэкваториальных до высоких широт [2–4]. В настоящее время существует около десятка действующих линеек приемников на базе низкоорбитальных навигационных систем в различных регионах мира. С 2001 г. начала функционировать РТ-система на Аляске, состоящая из 3–4 приемников, расположенных по цепочке вдоль 215°Е меридиана (по линии Cordova–Arctic Villa) и регистрирующих спутниковые радиосигналы УКВ-диапазона низкоорбитальной американской навигационной системы NNSS (Navy navigation satellite system).

В настоящей работе был проведен сравнительный анализ данных об электронной плотности, вычисленных по моделям GAIM (Global assimilation of ionospheric measurements) и IFM (Ionospheric forecast model) с 64 РТ-сечениями электронной плотности, полученными авторами статьи методом фазоразностной РТ по данным РТ-системы на Аляске с 26 октября по 1 ноября 2003 г. Исследуемый интервал охватывает как спокойный период, так и период экстремально высокой активности на Солнце. Целью сопоставления было выяснить применимость ионосферных моделей GAIM и IFM для прогнозирования состояния ионосферы при различных гелиогеомагнитных условиях. Отметим, что результаты ионосферной спутниковой РТ ранее неоднократно подтверждались данными ионозондов и радаров некогерентного рассеяния, в том числе в случаях зондирования областей высыпаний [3] и с большими градиентами электронной плотности [4].

1. Ионосферные модели GAIM и IFM

Модель ионосферы IFM основана на численном решении основных уравнений (изменения импульса, энергии; уравнения состояния и неразрывности) с учетом уровня солнечной и геофизической активности, т.е. в процесс вычислений включены текущие значения индексов F10.7 и K_p [5]. Модель IFM рассчитывает плотности электронов и ионов, электронную и ионную температуры. Размер дискрета вычислительной сетки составляет 3° по широте и 7.5° по долготе. Модель Глобальной ассимиляции ионосферных измерений GAIM использует в качестве основы модель IFM [5]. В модели GAIM процедура ассимиляции различного вида ионосферных измерений с помощью фильтра Кальмана используются данные всемирной сети ионозондов; электронная плотность *in situ*, интенсивность потоков высыпавшихся электронов и их средних энергий по данным спутников DMSP; данные сети GNSS; данные радиозатменных наблюдений; интенсивности ионизирующего солнечного излучения по данным спутников GOES, SOHO и т.д. [5]. Пространственное разрешение модели GAIM составляет 15° по долготе и 4.65° по широте. Модель GAIM непрерывно развивается, и предполагается повысить ее разрешение до 3.75° по долготе и 1° по широте. Модели IFM и GAIM охватывают диапазон высот от 92 до 1600 км и имеют переменный шаг от 4 км в области E до 18 км в области F ионосферы. Обе модели позволяют рассчитывать трехмерное распределение электронной плотности (по всему миру) с временным интервалом 15 мин.

Многие научные группы используют модель GAIM для получения информации об ионосфере [5–7], поэтому результаты сравнительного анализа модельных данных с РТ-результатами в районе Аляски, представляют интерес для многих радиофизических и геофизических приложений. Кроме того, подобные исследования ранее не проводились.

2. Сопоставление модельных расчетов с экспериментальными данными

Ниже представлены результаты сравнительного анализа модельных высотно-широтных распределений элект-

тронной плотности в области над РТ-системой на Аляске с РТ-сечениями ионосферы, полученными за период с 26 октября по 1 ноября 2003 г. Рассматриваемый недельный интервал охватывает как период спокойных геомагнитных условий, так и период экстремально высокого уровня гелиогеофизических возмущений. Исключительно большая буря наблюдалась 29–30 октября: K_p -индекс геомагнитной активности трижды достиг максимальной величины 9. Всего за исследуемый период было проанализировано 64 случая (сечения). Как правило, значения электронной плотности по модели IFM существенно завышены относительно экспериментальных данных (РТ-сечений), в частности в 80% случаев это превышение составляет 1,5–2 раза. Модель GAIM воспроизводит значения электронной концентрации заметно лучше: в 14 случаях модельные значения близки к значениям электронной плотности из РТ-сечений, в 18 случаях модельные значения занижены примерно в 1,5 раза, в остальных 32 случаях — завышены приблизительно в 1,3 раза.

2.1. Спокойные условия

В качестве примера на рис. 1 представлены в изолиниях в единицах 10^{12} м^{-3} высотно-широтные распределения электронной плотности ионосферы, полученные по модели GAIM (рис. 1, а) и методом фазоразностной РТ (рис. 1, б) для 26 октября в 18:08 UT при спокойных геомагнитных условиях ($K_p = 1.3$). Для модельных вычислений выбиралось время, ближайшее ко времени РТ-эксперимента, поэтому время для модельных данных меняется с шагом в 15 мин и отличается от времени РТ-эксперимента не более чем на 8 мин. Поскольку модель IFM, как показали вычисления, описывает гладкую однородную ионосферу с заметно завышенными значениями электронной плотности, то на рисунках мы не будем приводить сечения IFM. Модельное сечение GAIM (рис. 1, а) представляет собой гладкую ионосферу с локальным максимумом в районе 62° широты. В РТ-сечении ионосферы (рис. 1, б) на фоне плавного понижения значений электронной плотности с юга на север наблюдаются квазиволновые структуры в области максимума ионосферы на широтах 55° – 65° . На рис. 1, в представлены примеры высотных профилей электронной концентрации, вычисленных по модельным данным и РТ-сечению для широты 58.5° . Как видно из рисунка, модельный профиль GAIM незначительно отличается от экспериментального профиля. Максимум модельного профиля IFM практически в 2 раза превышает максимальные значения модельного профиля GAIM и РТ-профиля.

2.2 Возмущенные условия

На рис. 2 представлен один из примеров сопоставления модельных сечений с РТ-результатами для возмущенных геомагнитных условий (28 октября в 11:53 UT, $K_p = 4.7$). На РТ-реконструкции (рис. 2, б) наблюдается сложная структура ионосферы: провал в области широт 58° – 60° и квазиволновые возмущения к северу от провала в области от 60 до 64° . На модельном сечении GAIM (рис. 2, а) наблюдается изолированная неоднородность в районе 58° – 60° , а провал не идентифицируется. На рис. 2, в представлены высотные профили концентрации электронов, вычисленные по модельным и экспериментальным сечениям для широты 58.5° . Как видно из рисунка, модельные профили GAIM и IFM

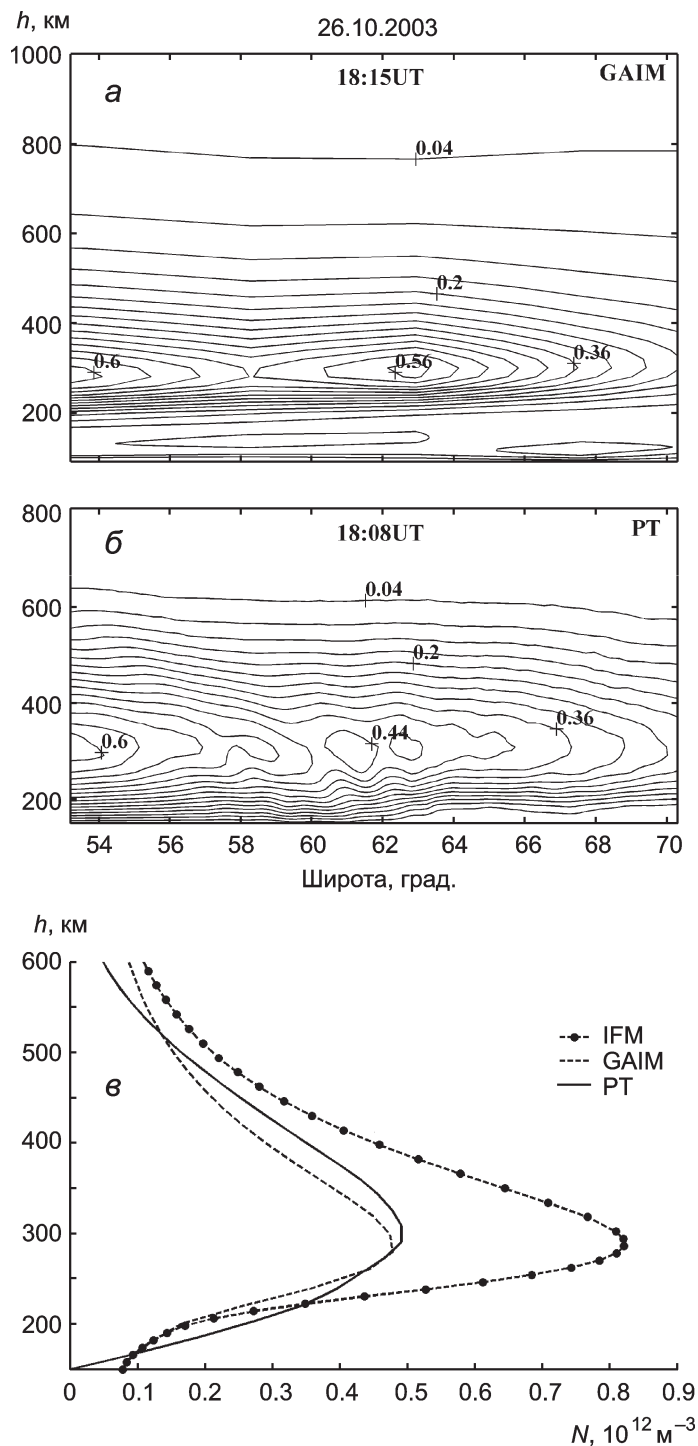


Рис. 1. Распределения электронной плотности в единицах 10^{12} м^{-3} , полученные по модели GAIM (а) и методом фазоразностной РТ (б) для спокойных условий 26 октября 2003 г. ($K_p = 1.3$). Соответствующие высотные профили электронной концентрации, вычисленные по модельным распределениям и РТ-сечению для широты 58.5° (в)

гладкие и подобны друг другу, но значительно отличаются от РТ-профиля как по значениям, так и по характеру поведения. На РТ-профиле наблюдается разделение максимума, что обусловлено провалом и сложной структурой ионосферы. Значения модельных профилей почти в 2,5–3,5 раза превышают значения РТ-профиля.

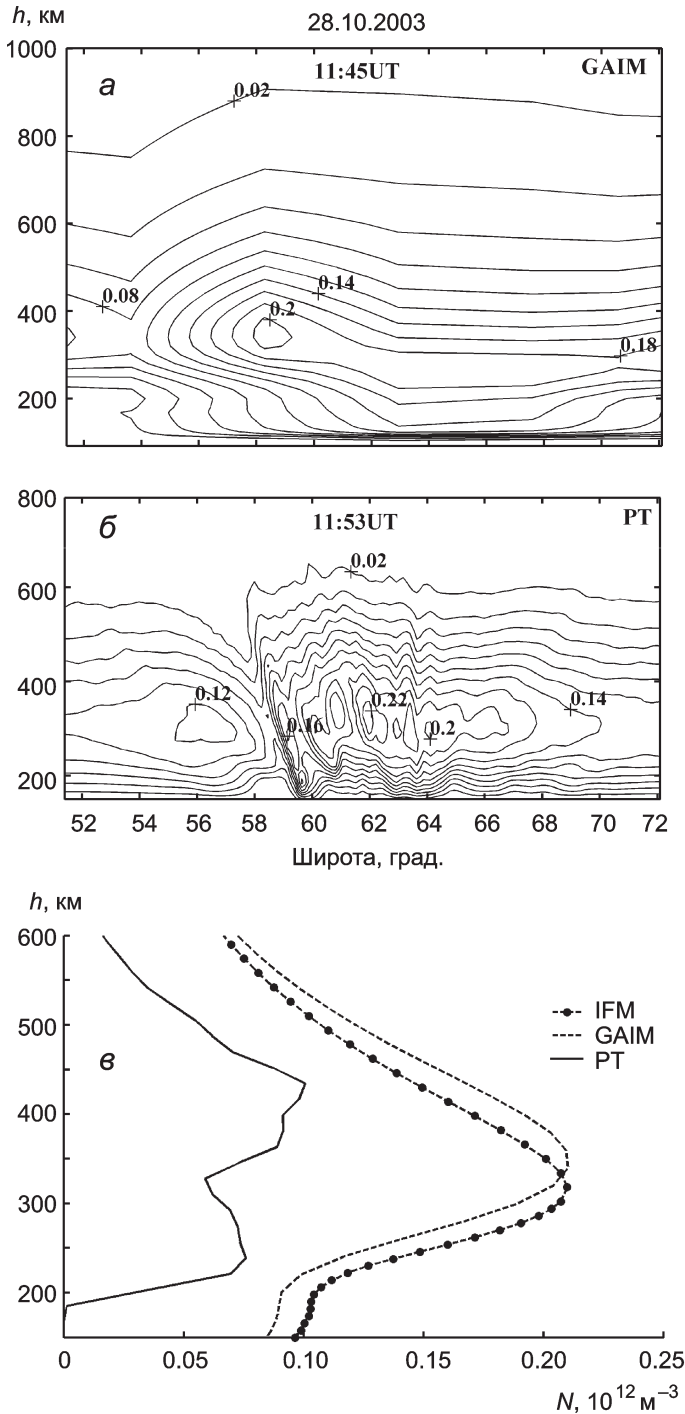


Рис. 2. Распределения электронной плотности в единицах 10^{12} м^{-3} , полученные по модели GAIM (а) и методом фазоразностной РТ (б) для возмущенных условий 28 октября 2003 г. ($K_p = 4.7$). Соответствующие высотные профили электронной концентрации, вычисленные по модельным распределениям и РТ-сечению для широты 58.5° (в)

В отличие от спокойных условий в возмущенные периоды модельные значения могут быть как завышены, так и занижены относительно значений электронной плотности из РТ-реконструкций. Пример сопоставления на рис. 3 относится к главной фазе магнитной бури — экстремально возмущенным геомагнитным условиям (30 октября в 22:50 UT, $K_p = 9$). На РТ-реконструкции (рис. 3, б) хорошо видно крупномасштабное «пятно»

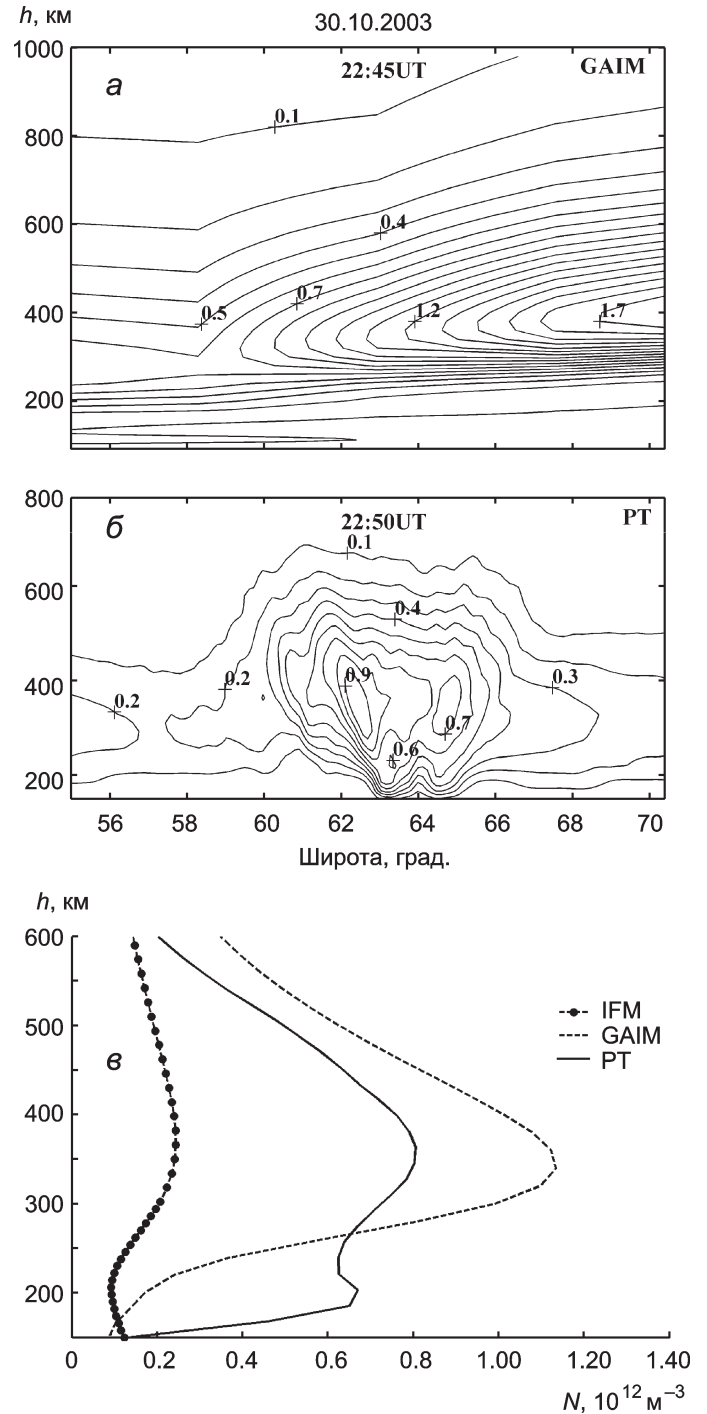


Рис. 3. Распределения электронной плотности в единицах 10^{12} м^{-3} , полученные по модели GAIM (а) и методом фазоразностной РТ (б) для периода экстремально большой бури 30 октября 2003 г. ($K_p = 9$). Соответствующие высотные профили электронной концентрации, вычисленные по модельным распределениям и РТ-сечению для широты 63.2° (в)

ионизации в широтной области от 62 до 66° , содержащее многоэкстремальную структуру с резким понижением электронной плотности к югу и к северу от «пятна» ионизации. Модельное сечение GAIM (рис. 3, а) представляет собой гладкую ионосферу, причем значения электронной плотности увеличиваются с юга на север. На рис. 3, в показаны высотные профили электронной плотности, вычисленные по модельным данным и РТ-се-

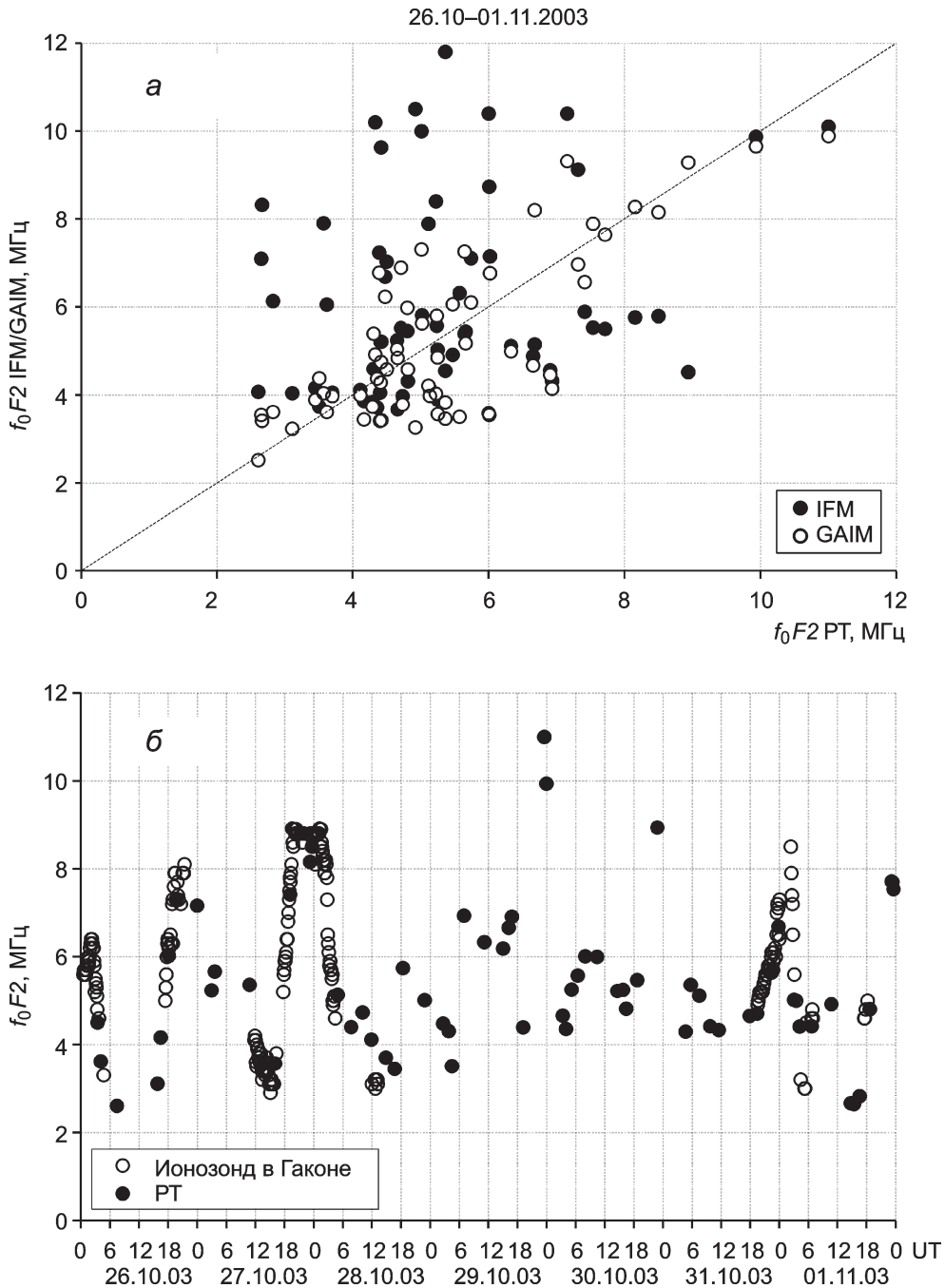


Рис. 4. Сравнение значений критических частот f_0F_2 , вычисленных по РТ-сечениям и по модельным данным (а). Сравнение значений f_0F_2 , вычисленных по РТ-сечениям и по данным ионозонда в Гаконе с 26 октября по 1 ноября 2003 г. (б)

чению для широты 63.2° . Все три профиля довольно сильно отличаются друг от друга: разделение РТ-профиля не выявлено в модельных профилях; значения из профиля GAIM превышают значения из РТ-профиля для высот выше 250 км; для высот от 150 до 250 км, наоборот, значения из РТ-профиля превышают значения из профиля GAIM. Кроме того, следует отметить сильно заниженные значения высотного профиля электронной плотности для модели IFM.

На рис. 4, а сопоставлены значения критических частот f_0F_2 , вычисленные по модельным данным и РТ-сечениям ионосферы за исследуемый период для ионозонда, расположенного в Гаконе с координатами (62.4°N , 215°E). Очевидно, что точки на биссектрисе прямого

угла соответствуют точному совпадению значений критических частот по модельным данным и вычисленных из РТ-реконструкций. Как видно из рисунка, наибольший разброс значений наблюдается для модели IFM. Были вычислены погрешности $\delta(l^2)$ — нормированные СКО соответствующих значений f_0F_2 по модельным данным относительно f_0F_2 из РТ-сечений, которые составили для модели IFM 63% и для модели GAIM 34%. Следует отметить, во время гелиогеофизических возмущений работа ионозондов часто нестабильна. В качестве иллюстрации на рис. 4, б представлены значения f_0F_2 по измерениям ионозонда в Гаконе и f_0F_2 из РТ-реконструкций для исследуемого периода. Как видно из рис. 4, б, данные ионозонда фрагментарны и начиная с 28.10.2003

(13:00 UT) по 31.10.2003 (19:30 UT), т.е. в период самой магнитной бури, отсутствуют. В возмущенные периоды происходит существенная перестройка ионосферы, что приводит к значительному изменению условий распространения радиоволн: резко возрастают электронная концентрация в области D и поглощение радиоволн и как следствие на многих ионограммах отсутствуют следы отраженных сигналов. В отличие от ионозондов, использующих КВ-радиоволны, РТ-методы позволяют исследовать структуру ионосферы и в периоды сильных гелиогеофизических возмущений, поскольку в задачах РТ из-за высоких частот зондирования (150/400 МГц) поглощением, как правило, можно пренебречь [2].

Заключение

Проведенный сравнительный анализ модельных данных с 64 РТ-сечениями электронной плотности за период с 26 октября по 1 ноября 2003 г. показал, что гладкая невозмущенная ионосфера адекватно описывается моделью глобальной ассимиляции ионосферных исследований GAIM. Как правило, значения электронной плотности, вычисленные по моделям GAIM и IFM, превышают значения из РТ-реконструкций. Погрешности данных модели GAIM относительно РТ-реконструкции составляют: $\delta(I^2) = 36.3\%$ (20 случаев) для спокойных и слабовозмущенных условий ($0 \leq K_p \leq 3$); $\delta(I^2) = 47.6\%$ (26 случаев) для возмущенных условий ($3 < K_p < 7$) и $\delta(I^2) = 52.5\%$ (18 случаев) для ($K_p \geq 7$) периода больших и очень сильных магнитных бурь. Погрешность данных модели IFM несопоставимо выше и даже для спокойных и слабовозмущенных условий превышает 100%. Во время сильных гелиогеофизических возмущений на РТ-сечени-

ях наблюдаются разнообразные и сложные ионосферные структуры: провалы и «стенки» ионизации, многоэкстремальные «пятна» ионизации, квазиволновые и волновые структуры и т.д. Во всех проанализированных случаях модель GAIM описывает сглаженную усредненную ионосферу и не воспроизводит структурные особенности ионосферы, которые наблюдаются в периоды бурь.

Авторы выражают благодарность центру Community Coordinated Modeling Center за предоставленные данные ионосферных моделей GAIM и IFM [8], а также North-West Research Associates за экспериментальные РТ-данные на Аляске [9].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-05-01120, 08-05-00676).

Список литературы

1. Андреева Е.С., Галинов А.В., Куницын В.Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. **52**. С. 783.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М., 2007.
3. Foster J.C., Buonsanto M.J., Holt J.M. et al. // Int. J. of Imaging Systems and Technology. 1994. **5**, N 2. P. 148.
4. Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E. // Radio Science. 2003. **38**, N 1. P. 1011.
5. Schunk R.W., Scherliess L., Sojka J.J., Thompson D. // Radio Science. 2004. **39**. P. RS1S02.
6. Scherliess L., Schunk R.W., Sojka J.J. et al. // J. Geophys. Res. 2006. **111**. P. A11315.
7. Zhu L., Schunk R.W., Jee G. et al. // Radio Science. 2006. **41**. P. RS5S11.
8. <http://ccmc.gsfc.nasa.gov>.
9. <http://www.haarp.alaska.edu/haarp/data.fcgi>.

Ionosphere over Alaska region during geomagnetic storm in October 2003: radiotomography and ionosphere GAIM/IFM models data

E. S. Andreeva^a, V. E. Kunitsyn^b, E. A. Leontyeva, Yu. N. Fedyunin

Department of Atmosphere Physics, Faculty of Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

E-mail: ^aes_andreeva@mail.ru, ^bkunitsyn@phys.msu.ru.

The results of comparative analysis of the GAIM and IFM ionospheric models with the radio tomographic images of the ionosphere and ionosonde data in Alaska region during the geomagnetic storm at the end of October 2003 are reported. The data comparison (64 cross-sections) revealed that the GAIM model data are essentially closer to the radio tomographic images than to the IFM data. However, the divergence between the GAIM model and radio tomography data increases with the ionospheric storminess enhancement.

PACS: 94.20.-y, 94.30.Lg.

Keywords: ionosphere, radio tomography, electron density, irregularities of ionospheric plasma, trough, magnetic storms.

Received 6 May 2008.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2009)

Сведения об авторах

1. Андреева Елена Станиславовна — к. ф.-м. н., ст. научн. сотр., доцент; тел.: 939-20-89, e-mail: es_andreeva@mail.ru.
2. Куницын Вячеслав Евгеньевич — д. ф.-м. н., профессор, зав. кафедрой; тел.: 939-38-06, e-mail: kunitsyn@phys.msu.ru.
3. Леонтьева Елена Александровна — аспирантка; e-mail: leon-03@bk.ru.
4. Федюнин Юрий Николаевич — д. ф.-м. н., профессор Академии торгового морского флота (США); e-mail: fedyuniny@usmma.edu.