

УДК 550.388.2;551.310.535

ПРИЭКВАТОРИАЛЬНАЯ ИОНОСФЕРА: СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ IRI, NeQuick И РАДИОТОМОГРАФИИ

© 2011 г. Е. С. Андреева, Б. А. Аношин, В. Е. Куницын, Е. А. Леонтьева

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

e-mail: kunitsyn77@mail.ru

Поступила в редакцию 10.05.2011 г.

После доработки 27.06.2011 г.

Представлены результаты сравнительного анализа ионосферных моделей IRI-2001, NeQuick с радиотомографическими реконструкциями ионосферы в области северного гребня экваториальной аномалии (ЭА) между Manila и Shanghai (~850 сечений). Анализируются измеренные в радиотомографическом эксперименте значения относительного наклонного полного содержания электронов и его соответствующих значений, вычисленных по моделям IRI-2001 и NeQuick. Сопоставление модельных сечений с измерениями ионозондов показало, что наибольшее расхождение в значениях критических частот ионосферного слоя F_2 наблюдается в области сильных пространственных градиентов в окрестности гребня ЭА. Обсуждаются особенности динамики гребня ЭА по модельным данным и результатам радиотомографии. Проведенные исследования показали, что модели IRI-2001, NeQuick описывают в среднем “фонтан-эффект”, но не отражают устойчивые структурные особенности ЭА, которые наблюдались в реконструкциях, в частности, ориентацию сформировавшегося ядра ЭА вдоль силовых линий магнитного поля Земли после полудня. Предложен способ коррекции моделей IRI-2001, NeQuick в окрестности максимума гребня ЭА.

1. ВВЕДЕНИЕ

Экваториальная аномалия (ЭА), или аномалия Эпплтона является основной структурой приэкваториальной ионосферы, которая существенным образом влияет на работу систем радиосвязи, радионавигации, локации и т.д. Поэтому исследование структурных особенностей ЭА и физических причин, определяющих ее формирование, развитие и изменчивость, является одной из актуальных и фундаментальных проблем физики ионосферы. В основе механизма формирования ЭА лежит явление “фонтан-эффекта”, которое заключается в следующем. В области геомагнитного экватора существующие геомагнитное поле (почти параллельное поверхности Земли) и восточно-западная компонента электрического поля вызывают дрейф заряженных частиц в поперечном обоим полям направлении. Возникает “фонтан-эффект”, т.е. плазма поднимается вверх в экваториальной области и постепенно поворачивает по направлению на север в северном полушарии и на юг – в южном, что вызвано увеличением наклона геомагнитных силовых линий по обе стороны от геомагнитного экватора. В результате в приэкваториальной области по обе стороны от геомагнитного экватора на геомагнитных широтах 10–20° образуются максимумы (или гребни) электронной концентрации, т.е. северный и южный гребни ЭА [Appleton, 1946; Moffett, 1979].

Лучевая радиотомография (РТ) открыла новые возможности в исследовании структуры и дина-

мики ЭА. Метод лучевой РТ ионосферы основан на регистрации и анализе радиосигналов двух когерентных частот 150 и 400 МГц навигационных российских спутников типа “Цикада” или американских Transit NNSS (Navy Navigation Satellite System) в нескольких приемных пунктах, расположенных на расстояниях порядка сотен километров друг от друга вдоль траектории восходящих или нисходящих витков орбит спутника. Орбиты таких спутников расположены на высотах 1000–1150 км, близки к полярным и имеют период обращения ~105 мин. Высокая скорость движения спутника (~7.9 км/с) позволяет пренебречь временными изменениями исследуемых ионосферных процессов за время пересечения спутником просвечиваемой области и рассматривать двумерную постановку задачи РТ. Характерная длительность РТ-регистрации составляет 10–15 мин. Измерения приведенной фазы (т.е. разности фаз между радиосигналами 150 и 400 МГц, приведенной к одной частоте) в приемных точках являются исходными данными для томографической реконструкции двумерных сечений ионосферы в вертикальной плоскости над приемной цепочкой. При этом измеряемые значения обусловлены только вкладом ионосферы и пропорциональны интегралу от электронной концентрации вдоль лучей между приемником на Земле и передатчиком на спутнике, но с точностью до неизвестной начальной фазы. На этой основе ранее был разработан метод фазоразностной РТ, позволивший преодо-

леть основную трудность при решении задачи — неопределенность начальной фазы принимаемого радиосигнала. Типичное разрешение метода лучевой РТ составляет до 30–40 км по вертикали и до 20–30 км по горизонтали [Куницын, 2007; 2010].

В 1994–1996 гг. был проведен РТ-эксперимент в Юго-Восточной Азии по низкоширотной трассе Shanghai — Manila в области северного гребня ЭА. Шесть пунктов наблюдений регистрировали спутниковые радиосигналы американской навигационной системы NNSS и были расположены вдоль 121° Е меридиана с координатами: Shanghai (31.3° N), Wenzhou (27.95° N), Chungli (24.95° N), Kaoshiung (22.5° N), Baguio (16.4° N), Manila (14.6° N). Проведенные совместно с коллегами из университета Иллинойса (США) исследования на базе фазоразностной РТ позволили выявить и изучить ряд новых структурных особенностей и динамику ЭА [Andreeva et al., 2000; Yeh et al., 2001; Franke et al., 2003].

Во многих случаях для получения необходимой (или недостающей) информации об ионосфере используются глобальные эмпирические ионосферные модели IRI (International Reference Ionosphere) и NeQuick, в частности, в области приэкваториальных широт. Цель данной работы — проведение сравнительного анализа данных моделей IRI-2001 и NeQuick с полученными ранее результатами РТ-исследований северного гребня ЭА ионосферы по низкоширотной трассе Manila — Shanghai, а также разработка метода коррекции модельных данных в окрестности максимума гребня ЭА. Результаты сравнительного анализа представляют интерес как для развития и совершенствования ионосферных моделей, так и для многих радиофизических и геофизических приложений.

2. ГЛОБАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ IRI, NeQuick

В настоящее время наиболее разработанной и динамично развивающейся является модель IRI (International Reference Ionosphere). Модель IRI относится к эмпирическим моделям ионосферы, непрерывно совершенствуется, и существуют ее последовательные версии, начиная с 1969 г. Основными источниками данных, которые используются в данной модели, являются: всемирная сеть ионозондов, спутниковые и ракетные измерения, а также данные радаров некогерентного рассеяния. Модель IRI позволяет вычислять профили электронной концентрации (в диапазоне высот от 50 до 2000 км), полное электронное содержание (ПЭС), температуры электронов, ионов, нейтралов и т.д. в зависимости от времени и координат [Bilitza, 2003]. Начиная с версии IRI-2001, для периодов геомагнитных бурь в модель введен коэффициент коррекции для критических частот

f_oF_2 , величина которого зависит от индексов геомагнитной возмущенности. Полная информация о модели постоянно обновляется и распространяется по сети Интернет. Домашняя страница IRI расположена на сайте: <http://iri.gsfc.nasa.gov/>. Пакет программ доступен по адресу <ftp://nssdcftp.gsfc.nasa.gov/models/ionospheric/iri/>.

Модель NeQuick — эмпирическая модель ионосферы, которая предназначена, в первую очередь, для вычисления ПЭС вдоль луча от навигационного спутника до пункта наблюдения. В модели NeQuick используются данные глобальной сети ионозондов, а также индексы солнечной активности (например, число солнечных пятен). Модель NeQuick позволяет получать профили электронной концентрации до высот 20000 км в зависимости от времени и географических координат [Coisson et al., 2008a]. Модельные расчеты можно проводить в интерактивном режиме на сайте <http://arpl.ictp.trieste.it/nq/>.

В ряде работ проводились сопоставления модельных данных с результатами ионозондовых измерений. Например, в работах [Abdu et al., 2006; Adeniyi et al., 2007; Dumin, 2007; Chuo and Lee, 2008; Gulyaeva et al., 2008] представлены результаты сравнительного анализа данных модели IRI с измерениями низкоширотных ионозондов по значениям критических частот f_oF_2 , максимума электронной концентрации NmF_2 и высоты максимума hmF_2 F-области ионосферы. В целом модель хорошо описывает годовые, сезонные и суточные вариации. Наибольшие расхождения модельных данных с экспериментальными результатами наблюдаются в зимние и осенние периоды при низкой солнечной активности. В вечерние часы модельные значения f_oF_2 и hmF_2 занижены относительно данных ионозондов, днем — завышены. Расхождения между модельными значениями критических частот f_oF_2 и данными f_oF_2 ионозондов могут достигать 17% днем и варьироваться от 5 до 80% в ночные часы, погрешности в определении высоты максимума hmF_2 по модельным данным составляют 25% ночью и 20% днем.

Исследования низкоширотной ионосферы и соответствующий анализ данных модели IRI проводились по данным спутниковых измерений (GPS, *Topex/Poseidon*, EXOS-C, EXOS-D, DMSP F15, KOMPSAT-1, ISIS 1, ISIS 2, Intercosmos-19, Cosmos-1809, CHAMP, ISS-b) [Карпачев, 1988; Деминов и др., 1998; Деминова, 2003; Karpachev et al., 2003; Ezquer et al., 2004; Jee et al., 2005; Kim et al., 2006; Liu et al., 2007; Bhuyan and Borah, 2007; Astafyeva et al., 2008]. Сопоставления модельных и экспериментальных данных проводились по вертикальному ПЭС (Vertical Total Electron Content — VTEC), по значениям критических частот f_oF_2 и электронной концентрации N . Результаты исследований показали, что модель IRI адекватно опи-

сывает суточные и сезонные вариации при спокойных геомагнитных условиях, хотя модельные вариации выражены слабее экспериментальных. Однако модель IRI существенно хуже воспроизводит годовые вариации. В ночные и утренние часы модельные значения вертикального ПЭС значительно выше экспериментальных. Наилучшее согласование между модельными и экспериментальными данными наблюдается в диапазоне широт от 18 до 31° в интервале времени с 8:00 до 22:00 LT.

В работах [Coisson et al., 2002; Coisson et al., 2006, Coisson et al., 2008b] представлены результаты верификации модели NeQuick в приэкваториальных широтах по данным спутников Topex/Poseidon, ISIS-2, Intercosmos-19, CHAMP, GPS. Сравнительный анализ модельных и экспериментальных данных проводился по значениям электронной плотности и вертикального ПЭС, выявлена систематическая недооценка значений электронной плотности и вертикального ПЭС моделью NeQuick в диапазоне высот от 500–1000 км по отношению к экспериментальным данным измерений в дневные часы в области ЭА при высокой солнечной активности.

В целом, для области приэкваториальных широт модель IRI считается наиболее точной из известных эмпирических моделей.

3. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ IRI-2001 И NeQuick С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАДИОТОМОГРАФИИ

3.1. Структурные особенности гребня ЭА

Ниже представлены результаты сравнительного анализа сечений ионосферы по данным моделей IRI-2001 и NeQuick с РТ-сечениями ионосферы в области северного гребня ЭА между Manila и Shanghai для осеннего периода 1994 г. Всего за этот период было получено более 850-ти РТ-реконструкций ЭА, из них около 550-ти – в дневное время. Прежде чем переходить к сопоставлению модельных и РТ-сечений, перечислим структурные особенности гребня ЭА, выявленные ранее с помощью фазоразностной РТ [Andreeva et al., 2000]: сформировавшееся “ядро” ЭА (область с электронной плотностью вблизи уровня максимума) ориентировано вдоль направления магнитного поля Земли; существует значительная асимметрия между экваториальным и полярным краем ЭА; обнаружены характерные чередующиеся области “расширение–сужение” толщины ионосферы в широтном диапазоне 15–31°; в области “ядра” ЭА происходит “продавливание” и “опускание” нижнего края ионосферного слоя, т.е. проникновение потока плазмы из F-области в нижние слои в районе широт 25–28°; в области за ядром ЭА (28–31°) образуется “перетяжка”.

Следует отметить, что в работе [Деминова, 1999] сообщается о некоторых особенностях распределения электронной концентрации в ночной низкоширотной ионосфере в южном полушарии, полученным по данным внешнего зондирования с ИСЗ “Интеркосмос-19”. В частности, к северу от южного гребня ЭА был зарегистрирован провал электронной концентрации в окрестности –18° геомагнитной широты. Причем с ростом высоты этот провал, постепенно уменьшаясь по глубине, смещался к экватору приблизительно вдоль силовой линии геомагнитного поля. По-видимому, положение наблюдаемого провала соответствует области “продавливания”, “опускания” нижнего края ионосферного слоя и образования “перетяжки”. В работе отмечается, что вероятность появления данного провала достаточно высока, чтобы учитывать его в моделях ионосферы.

На рисунке 1 представлены типичные дневные РТ-сечения ЭА (рис. 1а, г) и сечения ЭА по данным моделей IRI-2001 (рис. 1б, д) и NeQuick (рис. 1в, е). Двумерные распределения электронной плотности представлены в единицах 10^{12} м^{-3} и в координатах “географическая широта – высота ионосферы” (от 150 км до высоты спутника – ~1000 км). Силовые линии магнитного поля Земли нанесены на реконструкции штриховыми линиями. Сечения ЭА соответствуют локальному времени около полудня для 08.09.1994 г. в 13:50 LT (слева) и 05.10.1994 г. в 12:00 LT (справа). Прежде всего, следует отметить на РТ-реконструкциях (рис. 1а, г) ориентацию “ядра” ЭА вдоль силовых линий геомагнитного поля. Напротив, модельные сечения (рис. 1б, в, д, е) не отражают ориентацию “ядра” ЭА по направлению магнитного поля Земли. Кроме того, на РТ-реконструкциях хорошо заметна асимметрия краев ЭА. Если дальняя от экватора часть ЭА имеет достаточно выраженный закругленный край, то ближний к экватору сегмент ЭА изгибается вниз и напоминает структуру, подобную “хвосту” аномалии. Модельные сечения, наоборот, практически симметричны относительно максимума гребня ЭА. Следует отметить, что модель NeQuick более точно воспроизводит положение и значение максимума электронной концентрации (рис. 1в, е).

На рисунке 2 показаны записи наклонного ПЭС, измеренные непосредственно в РТ-эксперименте, и соответствующие значения наклонного ПЭС, вычисленные по данным моделей IRI-2001 и NeQuick в зависимости от широты местоположения спутника для нескольких приемных станций. В данном случае экспериментальные и модельные значения ПЭС (TEC – Total Electron Content) приведены к общему уровню путем вычитания соответствующих минимальных значений, поскольку экспериментальные измерения ПЭС относительны (с точностью до константы), а значения ПЭС, вычисленные по модельным

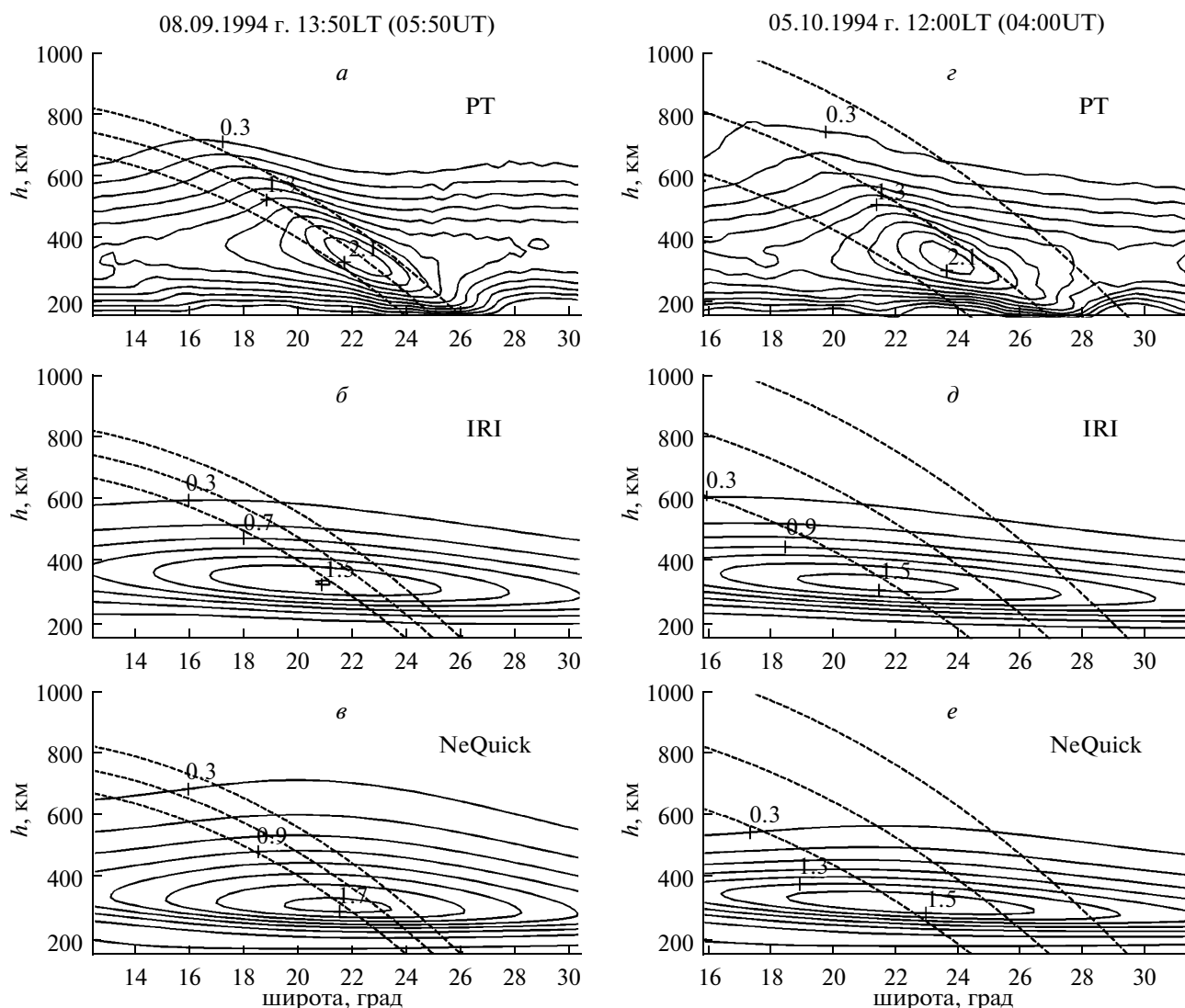


Рис. 1. Примеры типичных РТ-реконструкций ЭА (Manila–Shanghai) по данным 8 сентября 1994 г. в 13:50 LT – *a*, 5 октября 1994 г. в 12:00 LT – *г* и соответствующие модельные сечения ЭА: *б*, *д* – для модели IRI; *в*, *е* – для модели NeQuick.

данным – абсолютны. Для северных приемников, расположенных в Shanghai (31.3° N) и Wenzhou (27.95° N) (рис. 2*a*, *б*), хорошо виден пик в экспериментальных регистрациях ПЭС (ТЕС) на малых углах (до $10\text{--}15^\circ$), который свидетельствует о том, что существует структура, вытянутая вдоль силовых линий геомагнитного поля. В то же время максимум в модельных ПЭС (ТЕС) “разглажен” и “размыт” (рис. 2*a*, *б*), поскольку модели IRI и NeQuick не отображают ориентацию “ядра” ЭА (рис. 1*б*, *в*, *д*, *е*). В случае, когда приемные станции расположены южнее гребня аномалии, например, Manila (14.6° N) (рис. 2*в*) и Vaguio (16.4° N) (рис. 2*г*), модельные и экспериментальные записи ПЭС подобны, поскольку южные приемники слабо “чувствительны” к ориентации “ядра” аномалии по направлению геомагнитного поля.

Для анализа особенностей структуры ЭА целесообразно ввести следующие параметры: N_{max} – максимум электронной плотности в зависимости от широты; $V_{\text{ТЕС}}$ – вертикальное ПЭС как функция широты, которое вычисляется путем интегрирования значений электронной концентрации РТ-сечения ионосферы по высоте от 150 до 1000 км; W_{eff} – эффективная ширина ионосферного слоя и H_c – высота “центра масс” вертикального ионосферного столба, которые будут определены ниже. Поведение этих параметров проанализируем на примере рассмотренных выше модельных и РТ-сечений ЭА.

Поскольку в РТ-сечениях толщина ионосферного слоя меняется с широтой, то положение максимума электронной плотности (N_{max}) по широте, как правило, не соответствует положе-

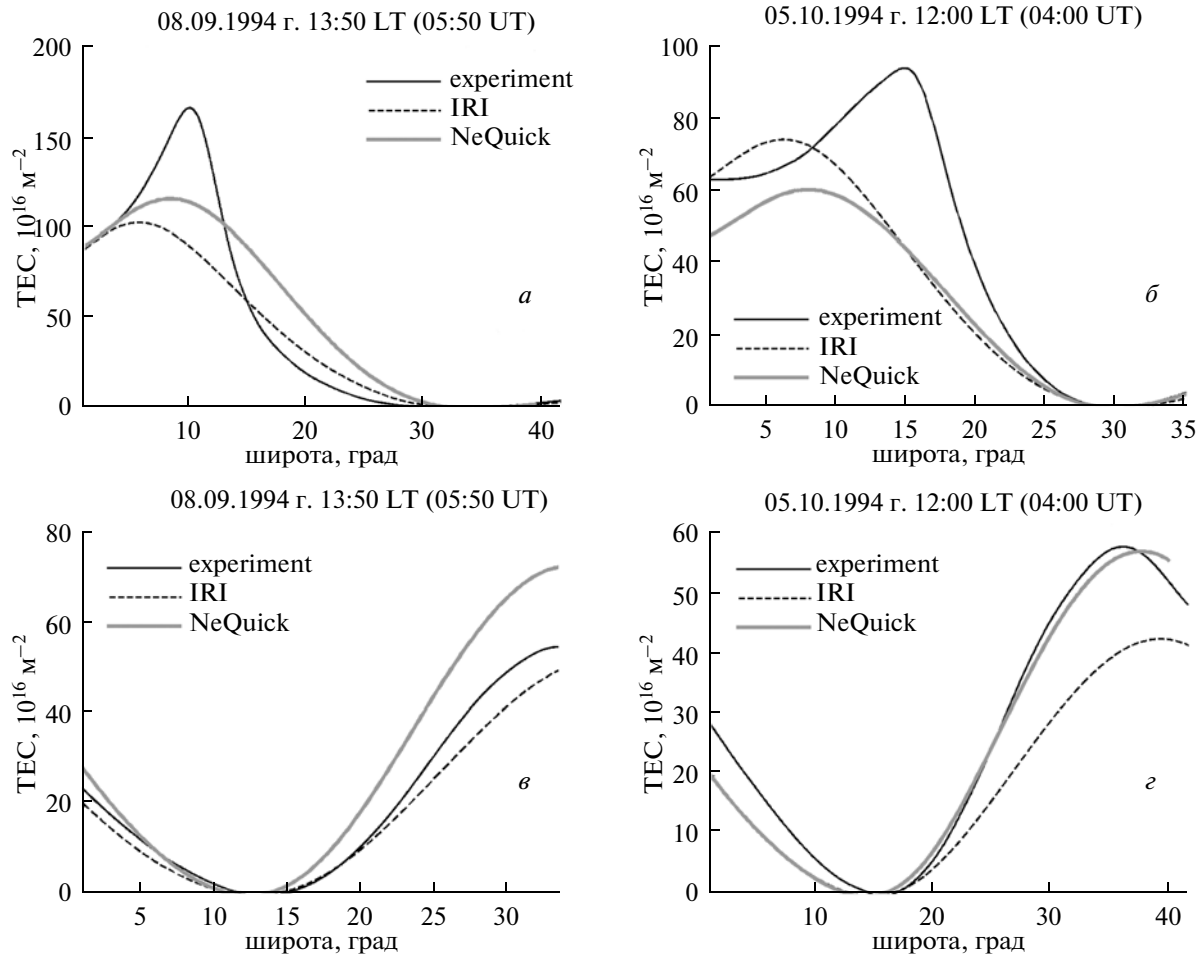


Рис. 2. Экспериментальные регистрации наклонного ПЭС (TEC) и соответствующие значения ПЭС (TEC), вычисленные по моделям IRI и NeQuick в зависимости от широты спутника для нескольких приемных станций: *a* – Shanghai (31.3° N); *b* – Wenzhou (27.95° N); *v* – Manila (14.6° N); *z* – Baguio (16.4° N).

нию максимума вертикального ПЭС (VTEC) для результатов РТ. Этот факт иллюстрирует рис. 3а, б, где приведены графики изменений экспериментальных N_{max} и VTEC. Для модельных сечений широта максимума электронной плотности совпадает с широтой максимума вертикального ПЭС (рис. 3а, б), поскольку модели не описывают асимметрию структуры ЭА.

Еще одной структурной особенностью, помимо наклона “ядра”, являются вариации полутолщины слоя. Для характеристики “толщины” слоя ионосферы был введен параметр W_{eff} – эффективная ширина ионосферного слоя, которая соответствует ширине параболического слоя, дающего такое же вертикальное ПЭС (VTEC), как и реальный слой, т.е. $VTEC = \frac{2}{3} W_{eff} N_{max}$. Таким образом, эффективная ширина ионосферного слоя W_{eff} пропорциональна отношению вертикального ПЭС (VTEC) к максимальному значению электронной концентрации на данной ши-

роте. Рисунок 3в иллюстрирует типичное поведение W_{eff} для РТ-реконструкции и модельных сечений. По результатам РТ первый максимум (в районе 16° N) характеризует расширение ионосферного слоя от экватора, далее уменьшение W_{eff} (в окрестности 22° N) соответствует сужению ионосферы и росту максимальной концентрации, причем минимум W_{eff} соответствует положению максимума ЭА. Дальнейшее увеличение W_{eff} (в районе 26–27° N) соответствует области, где ядро ЭА “продавливает” и “опускает” нижний край ионосферы. Тем самым следующий максимум определяет область “опускания” нижнего края ионосферного слоя. Последующее уменьшение W_{eff} соответствует сужению ионосферы до образования “перетяжки”, т.е. положение минимума характеризует положение “перетяжки”. В отличие от результатов РТ графики W_{eff} , вычисленные по модельным данным, представляют собой гладкие монотонные функции (рис. 3в).

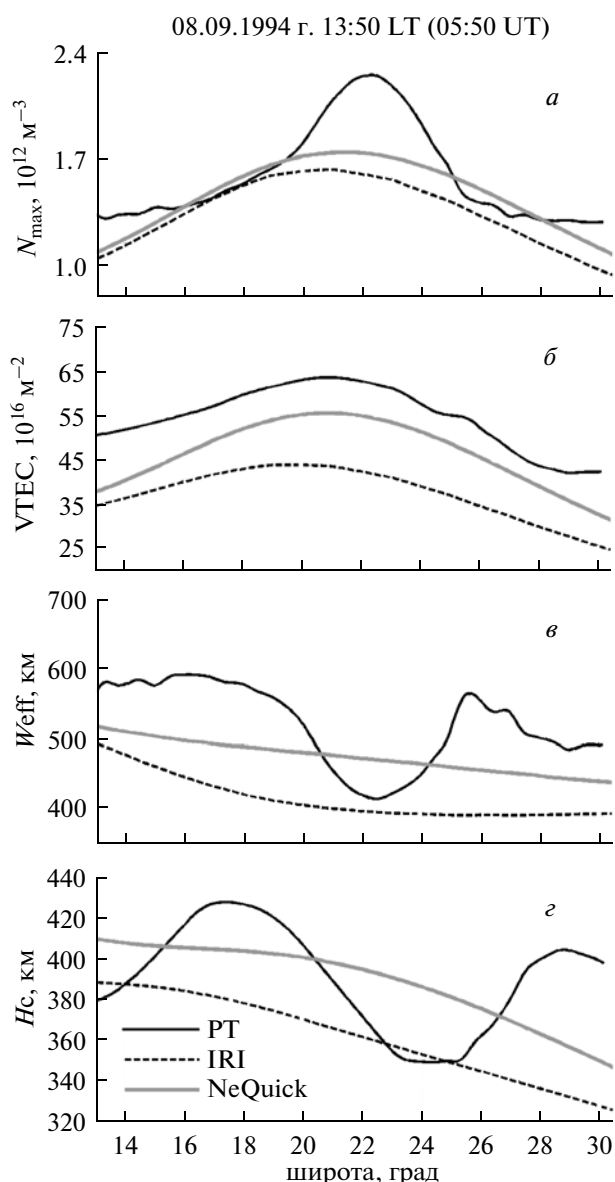


Рис. 3. Графики изменений ионосферных параметров в зависимости от широты для РТ-реконструкции ЭА (рис. 1а) и модельных сечений (рис. 1б, в): а – N_{\max} (максимум электронной плотности); б – VTEC (вертикальное ПЭС); в – W_{eff} (эффективная ширина ионосферного слоя) и г – H_c (высота “центра масс”).

“Изгибы” слоя определяются изменением положения краев и шириной ионосферного слоя. Для характеристики таких изгибов введен параметр H_c – высота “центра масс” вертикального ионосферного столба. Тогда траектория “центра масс” будет определять положение центра слоя. Для того чтобы выделить основной слой, целесообразно определять положение “центра масс” не всей ионосферы, а слоя, ограниченного, например, на уровне 20% от максимальной электронной концентрации снизу и сверху. Такие рассчитанные траектории “центра масс” приведены на

рис. 3г. По результатам РТ сначала “центр масс” поднимается, что связано с расширением ионосферы преимущественно вверх. Далее “центр масс” опускается, что соответствует “ядру” ЭА, ориентированному по магнитному полю. Причем минимальная величина H_c соответствует области “продавливания” и “опускания” нижнего края ионосферного слоя под воздействием потока плазмы вдоль силовых линий геомагнитного поля. Далее снова происходит подъем ионосферного слоя. Подобное поведение “центра масс” не характерно для модельных сечений ионосферы: модельные значения высоты “центра масс” H_c монотонно убывают с юга на север (рис. 3г).

Таким образом, модели IRI-2001 и NeQuick воспроизводят усредненную сглаженную структуру гребня ЭА. Иными словами, изгибов ионосферного слоя, вариации толщины ионосферы, “продавливания” и “опускания” нижнего края ионосферного слоя, формирование “перетяжки” обе модели не описывают.

3.2. Динамика гребня ЭА

Для осеннего периода 1994 г. было проанализировано более 2000 модельных сечений отдельно для моделей IRI-2001 и NeQuick. Для каждого модельного сечения определялись максимум электронной концентрации (N_{\max}) и его широтное положение. Затем вычислялись средние значения N_{\max} в зависимости от широты и времени путем усреднения всех значений N_{\max} внутри одночасового окна с центром в рассматриваемый момент времени. Полученные средние значения N_{\max} в зависимости от широты и локального времени представлены на рис. 4 в виде изолиний в единицах 10^{12} м^{-3} для октября и ноября 1994 г. (верхняя панель – для модели IRI-2001, нижняя панель – для модели NeQuick). По данным модели IRI в октябре (рис. 4а) с 10:00 до 14:00 LT гребень аномалии едва заметно перемещается в северном направлении примерно на 1° , достигая максимальных значений $2 \times 10^{12} \text{ м}^{-3}$ в окрестности 21° N . Затем гребень плавно перемещается в обратном направлении на юг, уменьшаясь в значении, и к 18:00 LT оказывается в окрестности 17° N . Следует отметить, динамика гребня ЭА по данным модели IRI практически подобна динамике гребня ЭА для модели NeQuick. Однако в ноябре согласно модели NeQuick наблюдается дневное развитие гребня аномалии на час раньше и регистрируется более быстрое движение на юг после 14:00 LT, чем по данным модели IRI (рис. 4б, г). В частности, для модели NeQuick в 18:00 LT гребень находится в районе 15° N (рис. 4г), т.е. за 4 часа (с 14:00 до 18:00 LT) гребень ЭА переместился на юг почти на 6° (с 21 до 15° N). Для модели IRI (рис. 4б) перемещение гребня за этот же временной интервал составляло $\sim 3^\circ$ (с 20 до 17° N). Та-

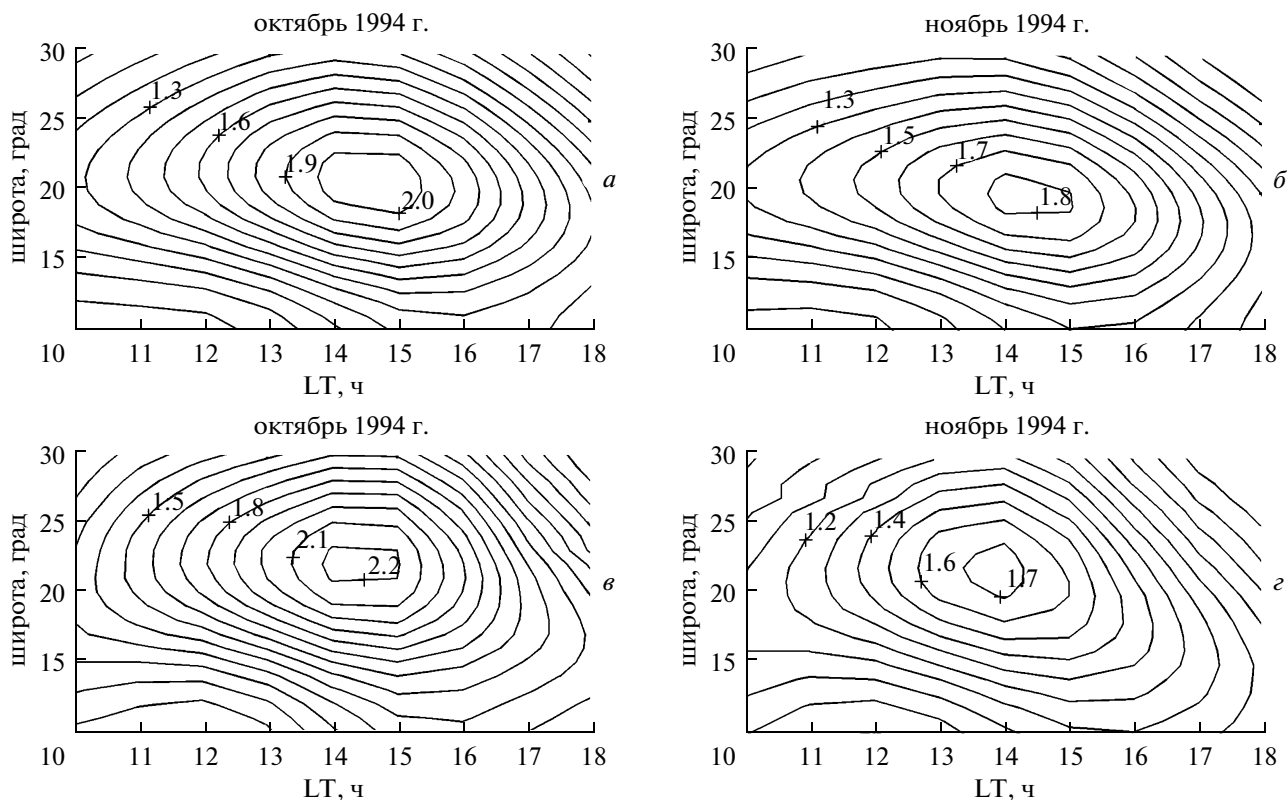


Рис. 4. Распределения средних модельных значений N_{max} в зависимости от широты и местного времени (LT) в единицах 10^{12} м^{-3} для октября и ноября 1994 г.: а, б – для модели IRI; в, з – для модели NeQuick.

ким образом, для моделей IRI-2001 и NeQuick характерно довольно медленное перемещение гребня ЭА в северном направлении с 10:00 до 14:00 LT и более быстрое движение гребня в обратном направлении в сторону экватора с 14:00 до 18:00 LT. Кроме того, по данным моделей IRI-2001 и NeQuick значения электронной концентрации в октябре выше, чем в ноябре (рис. 4), что согласуется с известными сезонными вариациями.

Распределение средних значений N_{max} по результатам РТ-реконструкций намного сложнее, чем по данным моделей IRI и NeQuick [Yeh et al., 2001; Franke et al., 2003]. Например, по результатам РТ в октябре 1994 г. гребень аномалии существует в 10:00 LT в районе широты 18.5° N. Затем, по мере формирования и развития, он движется в сторону севера. В дальнейшем, гребень движется на юг и затем вновь поворачивает на север, достигая 22° N около 16:00 LT. После этого, ослабевая, он отступает на юг до 18:00 LT. Такое северо-южное “волнообразное” движение гребня в районе аномалии формирует “двугорбое” распределение N_{max} в дневные часы [Franke et al., 2003].

В данном случае анализ динамики гребня ЭА ограничен временным интервалом от 10:00 до 18:00 LT, поскольку после 18:00 LT и до ~10:00 LT в большинстве случаев наблюдается практически

однородная ионосфера иногда с локальными неоднородностями. Таким образом, в отличие от модельных данных РТ регистрирует более сложную динамику гребня ЭА.

4. СОПОСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ МОДЕЛЕЙ IRI-2001 И NeQuick С ИЗМЕРЕНИЯМИ ИОНОЗОНДОВ

Ниже представлены результаты сопоставления модельных данных с измерениями двух ионозондов Chungli (24.9°N, 121.2° E) и Manila (14.7° N, 121.1° E) по критическим частотам $foF2$ для сентября, октября и ноября 1994 г. В качестве иллюстрации на рис. 5 показаны значения $foF2$, вычисленные для моделей IRI-2001 и NeQuick, и значения $foF2$ по данным ионозондов для октября 1994 г. Точки на биссектрисе прямого угла соответствуют точному совпадению значений критических частот по данным ионозондов с модельными значениями. Таким образом, точки вне биссектрисы указывают на расхождение этих значений. На рисунке 5 видно, что наибольший разброс модельных значений $foF2$ наблюдается для ионозонда Chungli. Для оценки погрешностей вычислялись нормированные СКО (δf) модельных значений относительно соответствующих $foF2$ по измерениям ионозондов. В таблице приведены вычис-

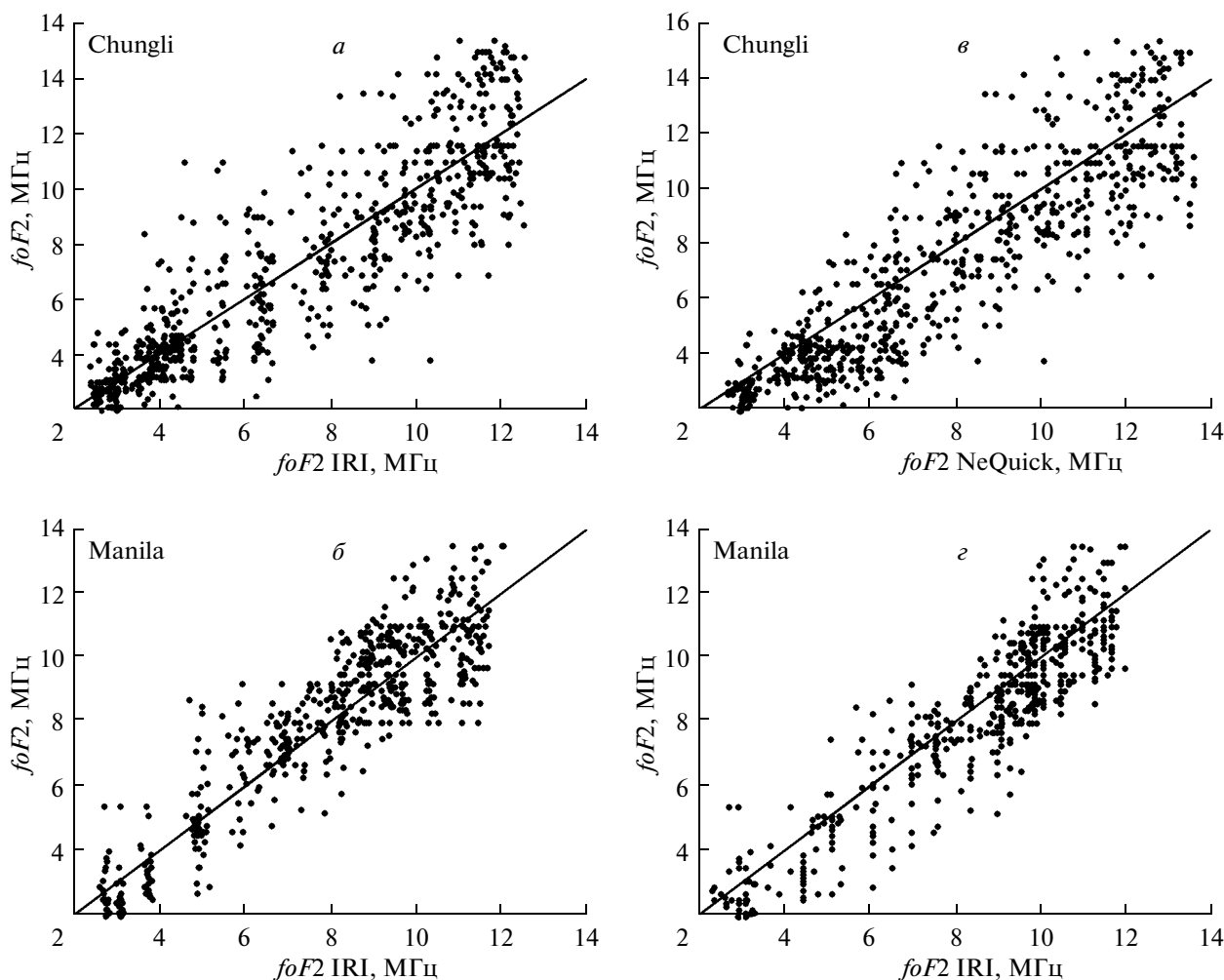


Рис. 5. Сравнение значений критических частот $foF2$, вычисленных по данным моделей IRI (а, б), NeQuick (в, г) и по данным ионосферных станций для октября 1994 г.: а, в – для Chungli; б, г – для Manila.

ленные значения δf для сентября, октября и ноября 1994 г. Например, для октября 1994 г. погрешности δf согласно модели IRI-2001 составили 20.9% для ионозонда Chungli и 16.1% для ионозонда Manila. Соответственно δf для модели NeQuick: 21.9% для ионозонда Chungli в отличие от 13.1% для ионозонда Manila. Как видно из таб-

лицы, модельные значения критических частот $foF2$ лучше согласуются с измерениями ионозонда Manila, нежели Chungli, а именно: погрешность δf для Chungli превышает в 1.2–2 раза соответствующие значения δf для Manila. Кроме того, модель NeQuick точнее воспроизводит значения критических частот, чем модель IRI-2001 (таблица).

Погрешности δf (нормированные СКО) значений критических частот $foF2$, вычисленных по данным моделей IRI-2001 и NeQuick относительно $foF2$ ионозондов

| Модели | Ионозонд Chungli δf (%) | | | Ионозонд Manila δf (%) | | |
|----------|---------------------------------|---------|--------|--------------------------------|---------|--------|
| | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь |
| IRI-2001 | 27.2 | 20.9 | 33.8 | 18.6 | 16.1 | 15.4 |
| NeQuick | 22.8 | 21.9 | 20.2 | 14.3 | 13.1 | 12.2 |

Ранее в работе [Franke et al., 2003] было проведено сопоставление РТ-сечений по трассе Manila – Shanghai с измерениями ионозондов (Chungli, Manila) по критическим частотам для октября и ноября 1994 г. Соответствующие погрешности δf критических частот из РТ-реконструкций относительно $foF2$ ионозондов не превышали 11.5%. При этом значения δf для ионозонда Chungli больше δf для ионозонда Manila. В отличие от ионозонда Manila ионозонд Chungli находится в районе максимума ЭА в области сильных градиентов электронной концентрации, где наиболее вероятны ошибки вертикального зондирования (ошибки ионозонда, связанные с наклонами ионосферных слоев), и, следовательно, ожидаемы наибольшие расхождения в критических частотах, чем на краю в области меньших градиентов (Manila).

5. КОРРЕКЦИЯ МОДЕЛЕЙ IRI И NeQuick В ОКРЕСТНОСТИ “ЯДРА” ЭА

В настоящее время известны работы по коррекции модели IRI в основном для средних и высоких широт с использованием данных Alouette/ISIS и GPS-TEC [Barabashov et al., 2006; Blanch et al., 2007; Bilitza, 2004; Gulyaeva et al., 2008]. В данной работе предложен способ коррекции ионосферных моделей IRI-2001 и NeQuick в области максимума гребня ЭА.

Как было отмечено выше, модели IRI-2001 и NeQuick не отображают ориентацию сформировавшегося “ядра” ЭА вдоль направления геомагнитного поля. Для повышения точности моделей была разработана процедура коррекции ориентации “ядра” ЭА. Поворот “ядра” ЭА вдоль линий магнитного поля Земли осуществлялся по следующему алгоритму: определение координат центра “ядра” ЭА по данным модельных сечений; определение характерных размеров “ядра” по широте (X) и высоте (Y); поворот модельных данных в окрестности “ядра” на угол, который рассчитывается из расположения магнитных силовых линий. Область, в которой производится поворот, описывается формулой двумерного гауссовского распределения с центром в середине “ядра” ЭА и значениями дисперсии, равными размерам “ядра” по X и Y .

В качестве примера на рис. 6 представлены скорректированные сечения ЭА, вычисленные по данным моделей IRI-2001 (рис. 6а) и NeQuick (рис. 6б) в полуденное время для 08.09.1994 г. Штриховыми линиями отмечены силовые линии магнитного поля Земли. Если до коррекции сформировавшееся “ядро” ЭА согласно модельным данным не было ориентировано вдоль силовых линий геомагнитного поля (рис. 1б, в), то после коррекции “ядро” ЭА ориентировано по направлению магнитного поля Земли (рис. 1а, б). Таким образом, скорректированные модельные

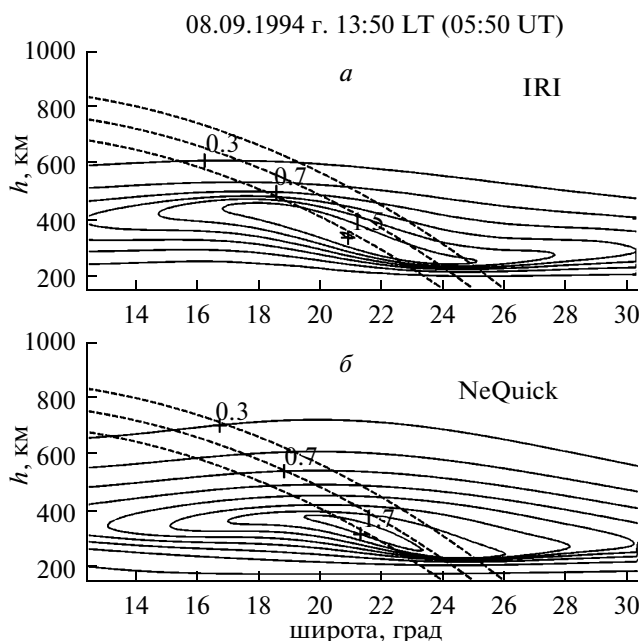


Рис. 6. Скорректированные модельные сечения ЭА для 08.09.1994 г., в 13:50 LT: а – для модели IRI; б – для модели NeQuick.

данные более точно воспроизводят структуру гребня ЭА.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплексный анализ модельных двумерных сечений ионосферы вдоль 121° Е меридиана между Manila и Shanghai для осени 1994 г. показал, что модели IRI-2001 и NeQuick описывают в среднем “фонтан-эффект”, т.е. воспроизводят усредненную сглаженную структуру ионосферы приэкваториальных широт. Данные модели не отображают ряд устойчивых структурных особенностей ЭА, которые наблюдались в РТ-реконструкциях: ориентацию сформировавшегося “ядра” ЭА вдоль направления магнитного поля Земли, существенную асимметрию краев ЭА, а также характерные сужения и расширения “верхнего” края и “толщины” ионосферы в районе ЭА. В модельных сечениях отсутствует также эффект “продавливания” нижней ионосферы плазменным потоком в области за “ядром” ЭА.

Проведенное сопоставление данных модельных сечений с измерениями двух ионозондов (Chungli и Manila) по критическим частотам для осени 1994 г. показало, что наибольшее расхождение в значениях критических частот наблюдается в районе Chungli, т.е. в области сильных пространственных градиентов в районе северного гребня ЭА.

Предложен способ коррекции глобальных эмпирических моделей IRI-2001 и NeQuick в обла-

сти максимума гребня ЭА. Скорректированные модельные сечения более точно описывают структуру гребня ЭА, а именно: сформировавшееся “ядро” ЭА ориентировано вдоль силовых линий магнитного поля Земли.

Авторы выражают благодарность профессорам L.-C. Tsai, С.Н. Liu и коллегам из Центра космических исследований Национального Центрального Университета (Тайвань, Chungli) и университета Иллинойса за предоставленные экспериментальные данные; разработчикам модели NeQuick из Международного центра теоретической физики (Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics – ICTP) и Института геофизики, астрофизики и метеорологии университета Грац (Institute for Geophysics, Astrophysics, and Meteorology at the University of Graz–IGAM); сотрудникам National Space Science Data Center (NSSDC), NASA’s Space Physics Data Facility (SPDF) и членам URSI/COSPAR Международной рабочей группы по модели IRI (http://iri.gsfc.nasa.gov/docs/iri_members.html) за программное обеспечение для модели IRI; сотрудникам National Geophysical Data Center (NGDC) и Space Physics Interactive Data Resource (SPIDR) за предоставленную возможность пользования базой данных всемирной сети ионозондов (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>). Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 10-05-01126, 11-05-01157), программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России” ГК № П 1072 и № П 167 и Министерства образования и науки РФ, проект 14.740.11.0203.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Деминова Г.Ф. Сравнение долготного распределения $foF2$ в ночной низкоширотной ионосфере по данным Интеркосмос-19 с моделью IRI и наземными данными // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 43. № 3. С. 377–381. 2003.
- Деминова Г.Ф. Об одной разновидности низкоширотного провала ионизации в южном полушарии // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 2. С. 118–120. 1999.
- Деминов М.Г., Коченова Н.А., Ситнов Ю.С. Долготные изменения электрического поля в дневной экваториальной ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. № 1. С. 71–75. 1998.
- Карпачев А.Т. Механизмы долготного эффекта в ночной экваториальной аномалии во внешней ионосфере // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 28. № 4. С. 620–624. 1988.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 335 с. 2007.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С., Нестеров И.А. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы // УФН. Т. 180. № 5. С. 548–543. 2010.
- *Abdu M.A., Batista I.S., Reinisch B.W., Sobral J.H.A., Carrasco A.J.* Equatorial F region evening vertical drift, and peak height, during southern winter months: A comparison of observational data with the IRI descriptions // *Adv. Space Res.* V. 37. № 5. P. 1007–1017. 2006.
- *Adeniyi J.O., Oladipo O.A., Radicella S.M.* Variability of $foF2$ for an equatorial station and comparison with the $foF2$ maps in IRI model // *J. Atmos. Solar-Terr Phys.* V. 69. № 6. P. 721–733. 2007.
- *Andreeva E. S., Franke J.S., Yeh K.C., Kunitsyn V.E.* Some features of the equatorial anomaly revealed by ionospheric tomography // *Geophys. Res. Lett.* V. 27. № 16. P. 2465–2468. 2000.
- *Appleton E.V.* Two anomalies in the ionosphere. *Nature.* 157. P. 157–691. 1946.
- *Astafyeva E.I., Afraimovich E.L., Oinats A.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V.* Dynamics of global electron content in 1998–2005 derived from global GPS data and IRI modeling // *Adv. Space Res.* V. 42. № 4. P. 763–769. 2008.
- *Barabashov B.G., Maltseva O., Pelevin O.* Near real time IRI correction by TEC-GPS data // *Adv. Space Res.* V. 37. № 5. P. 978–982. 2006.
- *Bilitza D.* International reference ionosphere 2000: Examples of improvements and new features // *Adv. Space Res.* V. 31. № 3. P. 757–767. 2003.
- *Bilitza D.* A correction for the IRI topside electron density model based on Alouette/ISIS topside sounder data // *Adv. Space Res.* V. 33. № 6. P. 838–843. 2004.
- *Blanch E., Arrazola D., Altadill D., Buresova D., Mosert M.* Improvement of IRI B0, B1 and D1 at mid-latitude using MARP // *Adv. Space Res.* V. 39. № 5. P. 701–710. 2007.
- *Bhuyan P.K., Borah R.* TEC derived from GPS network in India and comparison with the IRI // *Adv. Space Res.* V. 39. № 5. P. 830–840. 2007.
- *Chuo Y.J., Lee C.C.* Ionospheric variability at Taiwan low latitude station: Comparison between observations and IRI-2001 model // *Adv. Space Res.* V. 42. № 4. P. 673–681. 2008.
- *Coisson P., Radicella S.M., Nava B.* Comparisons of experimental topside electron concentration profiles with IRI and NeQuick models // *Ann. Geophysics.* V. 45. № 1. P. 111–116. 2002.
- *Coisson P., Radicella S.M., Leitinger R., Nava B.* Topside electron density in IRI and NeQuick: Features and limitations // *Adv. Space Res.* V. 37. № 5. P. 937–942. 2006.
- *Coisson P., Radicella S.M., Nava B., Leitinger R.* Low and equatorial latitudes topside in NeQuick // *J. Atmos. Solar-Terr Phys.* V. 70. № 6. P. 901–906. 2008a.
- *Coisson P., Nava B., Radicella S.M., Oladipo O.A., Adeniyi J.O., Gopi Krishna S., Rama Rao P.V.S., Ravindran S.* NeQuick bottomside analysis at low latitudes // *J. Atmos. Solar-Terr Phys.* V. 70. № 15. P. 1911–1918. 2008b.
- *Dumin Y.V.* The accuracy of IRI in the description of development of the equatorial (Appleton) anomaly // *Adv. Space Res.* V. 39. № 5. P. 687–690. 2007.
- *Ezquer R.G., Brunini C., Mosert M., Meza A., Oviedo R. del V., Kiorcheff E., Radicella S.M.* GPS–VTEC mea-

- surements and IRI predictions in the South American sector // *Adv. Space Res.* V. 34. № 9. P. 2035–2043. 2004.
- *Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E.* A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images // *Radio Sci.* V.38. N 1. doi:10.1029/2002RS002657. P. 11-1–11-12. 2003.
- *Gulyaeva T.L., Bradley P.A., Stanislawska I., Juchnikowski G.* Towards a new reference model of *hmF2* for IRI // *Adv. Space Res.* V. 42. № 4. P. 666–672. 2008.
- *Jee G., Schunk R.W., Scherliess L.* Comparison of IRI-2001 with TOPEX TEC measurements // *J. Atmos. Solar-Terr Phys.* V. 67. № 4. P. 365–380. 2005.
- *Karpachev A.T., Deminova G.F., Depuev V.H., Kochenova N.A.* Diurnal variations of the peak electron density distribution pattern at low latitudes derived from Intercosmos-19 topside sounding data // *Adv. Space Res.* V. 31. № 3. P. 521–530. 2003.
- *Kim H., Min K., Park J., Lee J., Lee E., Kil H., Kim V.P., Park S.* Comparison of satellite measurements of the low-latitude nighttime upper ionosphere with IRI // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* V. 68. № 18. P. 2107–2118. 2006.
- *Liu H., Stolle C., Watanabe S., Abe T., Rother M., Cooke D. L.* Evaluation of the IRI model using CHAMP observations in polar and equatorial regions // *Adv. Space Res.* V. 39. № 5. P. 904–909. 2007.
- *Moffett R.J.* The Equatorial Anomaly in the electron distribution of the terrestrial *F*-region // *Fundamentals of Cosmic Physics.* V. 4. P. 313–391. 1979.
- *Yeh K.C., Franke S.J., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E.* An investigation of motions of the equatorial anomaly // *Geophys. Res. Lett.* V. 28. № 24. P. 4517–4520. 2001.