

ГЕОФИЗИКА

УДК 550.388.2

ВОЗМОЖНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ СТРУКТУРЫ E - И D-ОБЛАСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ЛУЧЕВОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ

Е. С. Андреева

(кафедра физики атмосферы)

E-mail: andreeva@phys.msu.su

Проанализирована возможность реконструкции структуры E- и D-областей ионосферы методом лучевой радиотомографии. Приведены оценки относительного вклада E- и D-областей в экспериментальные данные, показывающие практическую невозможность восстановления D-области. На примерах численного моделирования и данных радиотомографического эксперимента, проведенного в Юго-Восточной Азии, продемонстрирована возможность восстановления структуры E-области ионосферы.

Введение

В последние годы интенсивно развиваются методы радиотомографии (РТ), позволяющие восстанавливать пространственную структуру распределения электронной концентрации при радиозондировании ионосферы. Существующие спутниковые навигационные системы и набор приемников на Земле дают возможность определять интегралы по лучам от показателя преломления ионосферы и получать серии томографических данных. Исследования ионосферы методом лучевой РТ и ее приложениями вызывают заметный интерес в мире. В настоящее время более десяти научных групп и лабораторий ведут работы в этом направлении [1–14]. С начала девяностых годов были проведены серии успешных экспериментов по реконструкции структуры ионосферной плазмы F-области с помощью томографических методов в различных регионах Европы, Америки и Юго-Восточной Азии. Все проведенные эксперименты были реализованы с использованием среднеорбитальных навигационных российских спутников типа «Цикада» и американских «Транзит», имеющих практически круговую орбиту на высоте около 1000 км. Прием двух когерентных спутниковых сигналов на частотах 150 и 400 МГц и регистрация разности фаз между ними (приведенной фазы) осуществлялись на цепочке из нескольких наземных приемных станций, расположенных вдоль траектории спутников и на расстояниях порядка сотен километров. Измерения приведенной фазы φ в нескольких приемных точках являются данными для томографической реконструкции, причем измеряемые значения обусловлены только вкладом ионосферы и пропорциональны интегралу от электронной концентрации N вдоль лучей L между приемником на Земле и передатчиком на спутнике, но с точностью до неизвестной начальной фазы φ_0 :

$$\gamma \lambda r_e \int_L N ds = \varphi + \varphi_0, \quad (1)$$

где r_e — классический радиус электрона, ds — элемент длины луча, λ — длина зондирующей волны, коэффициент пропорциональности γ порядка единицы определяется выбором опорной частоты, на которой измеряется приведенная фаза. Погрешности в оценке начальных фаз φ_0 у разных приемников приводят к противоречивости и несогласованности данных, и, как результат, к низкому качеству реконструкций с существенными искажениями. Поэтому ранее был разработан метод фазоразностной РТ, т. е. РТ по разности линейных интегралов на близких лучах, не требующий определения начальной фазы [1, 3, 10]. Для фазовой РТ, в отличие от фазоразностной, нужна особая процедура определения начальной фазы для каждого из приемников, которая должна быть включена в процесс восстановления. После дискретизации задача томографической реконструкции сводится к решению системы линейных уравнений (СЛУ). Более подробно детали построения СЛУ (выбор аппроксимаций, ошибки аппроксимаций и их влияние на решение и т. д.), методы решения СЛУ, а также вопросы точностей, ограничений и неединственности РТ, связанные с использованием неполных данных, рассмотрены в [3, 9, 10]. Описание развитых новых методов анализа пространственных структур на основе томографического анализа радиосигналов навигационных искусственных спутников Земли, разнообразные примеры экспериментальных РТ-реконструкций субавроральной, среднеширотной и приэкваториальной ионосферы и связанные с ними геофизические результаты представлены в [10].

1. Радиотомография F-области

Проведенные в последние годы эксперименты показали широкие возможности лучевой РТ для

исследований разнообразных ионосферных возмущений в F -области. Были продолжены исследования как известных структур (провал, перемещающиеся ионосферные возмущения, локальные экстремумы и т. д.), так и малоизвестных структур, обнаруженных методами РТ («пальцеобразные» структуры, наклонный провал, ядро и изгибы экваториальной аномалии, «квазиволновые» структуры, перепады ионизации в форме стенок, «пятна» повышенной электронной концентрации внутри провала и др.) [10, 13]. Часть упомянутых структур невозможно получить другими методами. Например, «пальцеобразные» неоднородности на больших высотах практически не могут быть выделены методом некогерентного рассеяния, а неоднократно наблюдаемый узкий наклонный провал не распознается ионозондом и т. д. Сравнение РТ-результатов с данными ионозондовых измерений и с данными радаров некогерентного рассеяния показало высокое качество РТ-реконструкций и существенное преимущество подхода фазоразностной РТ по сравнению с другими подходами [2, 8, 10, 12]. Результаты проведенных экспериментов показывают, что лучевая РТ является практически единственным широкодоступным способом диагностики крупномасштабных и глобальных ионосферных образований, которые определяют глобальную и региональную динамику ионосферной плазмы.

Однако РТ на базе среднеорбитальных спутников с использованием сети наземных приемников имеет ограничения, в частности в этом случае наряду с хорошим горизонтальным разрешением недостаточно точно восстанавливаются вертикальные профили тонких горизонтально вытянутых ионосферных структур. Вариант РТ ионосферы, где наряду с наземной регистрацией спутниковых сигналов используются данные радиопросвечивания по направлениям спутник–спутник (например, регистрация сигналов с навигационных систем GPS/ГЛОНАСС на низко- и среднеорбитальных спутниках), т. е. совместное использование РТ- и радиозатменных (РЗ) методов имеет больше возможностей. Использование данных РЗ-экспериментов позволяет получать дополнительную информацию об ионосфере на семействе «квазикасательных» лучей и тем самым улучшить вертикальное разрешение. В частности, в работе [15] на примерах численного моделирования показано, что дополнительное использование данных РЗ-экспериментов улучшает точность восстановления структуры E -области, а также реконструировать спорадический слой E_s . Тем не менее несмотря на многочисленные эксперименты, пересечений данных по наземной регистрации и по РЗ-экспериментам крайне мало. Поэтому рассмотрение задачи восстановления структуры E -области ионосферы методом РТ с использованием сети наземной регистрации сигналов от среднеорбитальных спутников представляет практический интерес и

является важным для многих геофизических приложений.

Работ, посвященных восстановлению структуры E -области ионосферы методами РТ при наземном приеме радиосигналов, очень мало [6, 7, 11, 12]. Это лишь свидетельствует о том, что восстановление структуры E -области представляет собой непростую задачу, поскольку вклад E -области в регистрируемые экспериментальные данные значительно меньше вклада F -слоя. С помощью метода фазовой РТ были предприняты попытки реконструкции E -слоя в авроральных широтах [6, 7], которые свелись к увеличению плотности лучей, пересекающих один дискрет разбиения искомого распределения электронной концентрации. Данные результаты вызывают определенные сомнения, поскольку в процессе реконструкции использовалась кусочно-постоянная аппроксимация реконструируемой функции, которая дает очень большую ошибку аппроксимации (до 10%) [9, 10], которая сопоставима или превышает вклад E -области в экспериментальные данные. Более того, восстановление проводилось с помощью фазовой РТ, имеющей вертикальное разрешение гораздо ниже по сравнению с фазоразностной РТ. Также остается неясным, учитывали ли авторы кривизну Земли.

В качестве априорной информации для оценки профиля и уровня начального приближения можно использовать измерения ионозондов, если такие доступны. Тем не менее даже в отсутствии данных ионозондовых измерений, как будет показано ниже, в некоторых случаях, в частности когда E -область является неоднородной (именно этот случай представляет интерес для томографии), возможно восстановление ее структуры.

2. Оценки вклада E и D -областей в экспериментальные данные

Прежде чем приступить к обсуждению численного моделирования и экспериментальных результатов, приведем оценки вкладов D - и E -областей в данные измерений. Слой D занимает область высот от 50 до 90 км, максимум находится на высоте около 70 км. В области D наблюдаются наиболее низкие значения электронной концентрации, величина $N_{\max}^{(D)}$ обычно не превышает 10^2 см^{-3} . Слой E образуется, в основном, на высотах от 90 до 150 км. Величины электронной концентрации составляют, как правило, $N_{\max}^{(E)} \sim (1 \div 4) \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ днем, уменьшаясь ночью более чем на порядок. Однако это некоторые усредненные и оценочные цифры. В общем случае электронная концентрация заметно меняется в зависимости от широты, времени суток, сезона, гелио- и геомагнитной обстановки (бури, вспышки) и т. д. Здесь для нас существенным образом оценки относительных вкладов D - и E -областей по сравнению с F -областью, РТ-реконструкции которой успешно реализованы ранее.

Кроме того, относительные оценки имеют значительно меньший разброс и слабее зависят от широты, времени суток и геофизических условий, поскольку изменения в различных областях ионосферы, как правило, подобны и пропорциональны:

$$\frac{N_{\max}^{(D)}}{N_{\max}^{(F)}} \sim (1 \div 2) \cdot 10^{-4}; \quad \frac{\text{TEC}^{(D)}}{\text{TEC}^{(F)}} \sim (1 \div 2) \cdot 10^{-5};$$

$$\frac{N_{\max}^{(E)}}{N_{\max}^{(F)}} \sim (0.3 \div 3) \cdot 10^{-1}; \quad \frac{\text{TEC}^{(E)}}{\text{TEC}^{(F)}} \sim (0.5 \div 5) \cdot 10^{-2}.$$

Здесь приведены оценки, включающие максимальные концентрации в различных слоях и TEC (total electron content) — полные электронные содержания различных слоев. Напомним, что в соответствии с (1) приведенная фаза φ пропорциональна TEC, поэтому относительный вклад в суммарный TEC областей D или E пропорционален относительной вариации фазы, связанной с вкладом данной области. При использовании фазоразностного (доплеровского) подхода относительная вариация Доплера, обусловленная вкладом D - или E -областей в суммарный сигнал, пропорциональна отношению максимальных электронных концентраций [3, 10]. Данные оценки показывают, что восстановить распределение электронной концентрации в D -области на фоне F -области практически невозможно, поскольку ее относительный вклад в экспериментальные данные существенно меньше ошибок измерений и аппроксимации. Восстановить распределения электронной концентрации в E -области на фоне F -области фазовым методом, как правило, нельзя, так как относительный вклад E -области в фазу составляет единицы процентов, что сопоставимо (или меньше) с ошибкой аппроксимации, достигающей единиц процентов. В случае фазоразностного подхода относительная вариация Доплера, обусловленная

E -областью, достигает десятков процентов, что заметно превышает ошибку аппроксимации.

3. Результаты численного моделирования

Геометрия реального РТ эксперимента, проведенного в области экваториальной аномалии (ЭА) в Юго-Восточной Азии по низкоширотной трассе Шанхай–Манила (14.6°N – 31.3°N) вдоль 121°E меридиана, представлена на рис. 1 [14]. В частности, на рис. 1, *a* изображены крайние лучи, соединяющие передатчик на спутнике на высоте 1000 км и шесть приемников на Земле с координатами (0, 200, 878, 1156, 1490 и 1850 км по поверхности Земли), расположенными в плоскости пролета спутника, а также область E , отмеченная серым цветом. Увеличенное изображение области E (h от 90 до 150 км) представлено на рис. 1, *б*, где серым цветом указан сегмент в E -области пересечения лучей от трех и более приемников. Таким образом, геометрия эксперимента дает возможность восстановить структуру E -области РТ-методами. Ниже на примерах численного моделирования и данных РТ эксперимента покажем возможность восстановления структуры E -области ионосферы. Все результаты получены на базе метода фазоразностной РТ [3, 10]. При построении томографической СЛУ использовалась билинейная аппроксимация проекционного оператора, а для ее решения применялись комбинации различных итерационных алгоритмов [9, 10]. Поскольку итерационные алгоритмы решения СЛУ требуют задания начального приближения, то в процессе решения анализировалось «поведение» восстанавливаемой функции «на краях» области реконструкции и подбиралось соответствующее начальное приближение. Более подробно анализ краевых эффектов в задачах лучевой радиотомографии рассмотрен в работе [16].

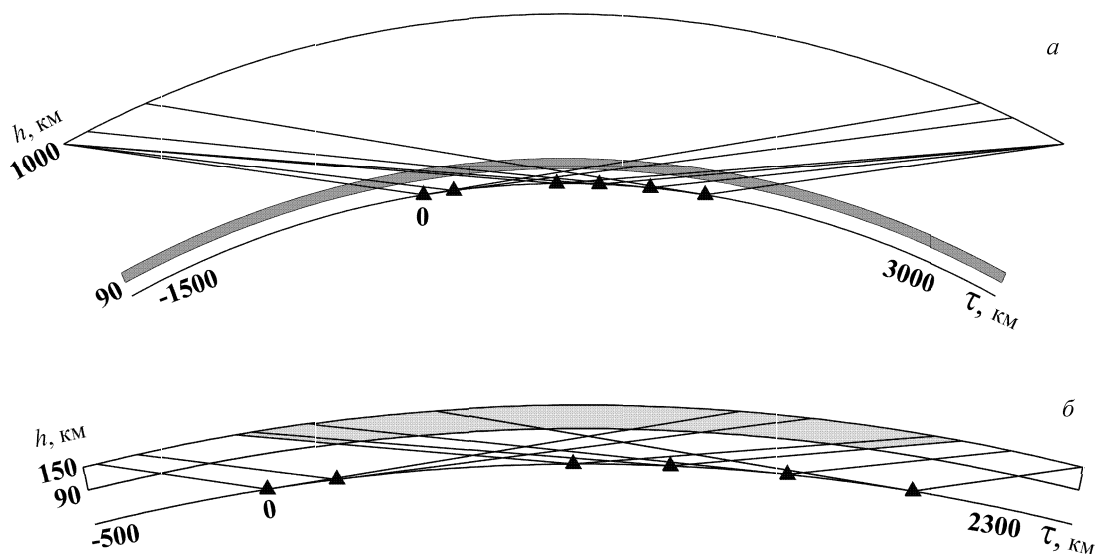


Рис. 1. Схема геометрии реального РТ эксперимента, проведенного в области экваториальной аномалии в Юго-Восточной Азии по низкоширотной трассе Шанхай–Манила (14.6°N – 31.3°N) вдоль 121°E меридиана

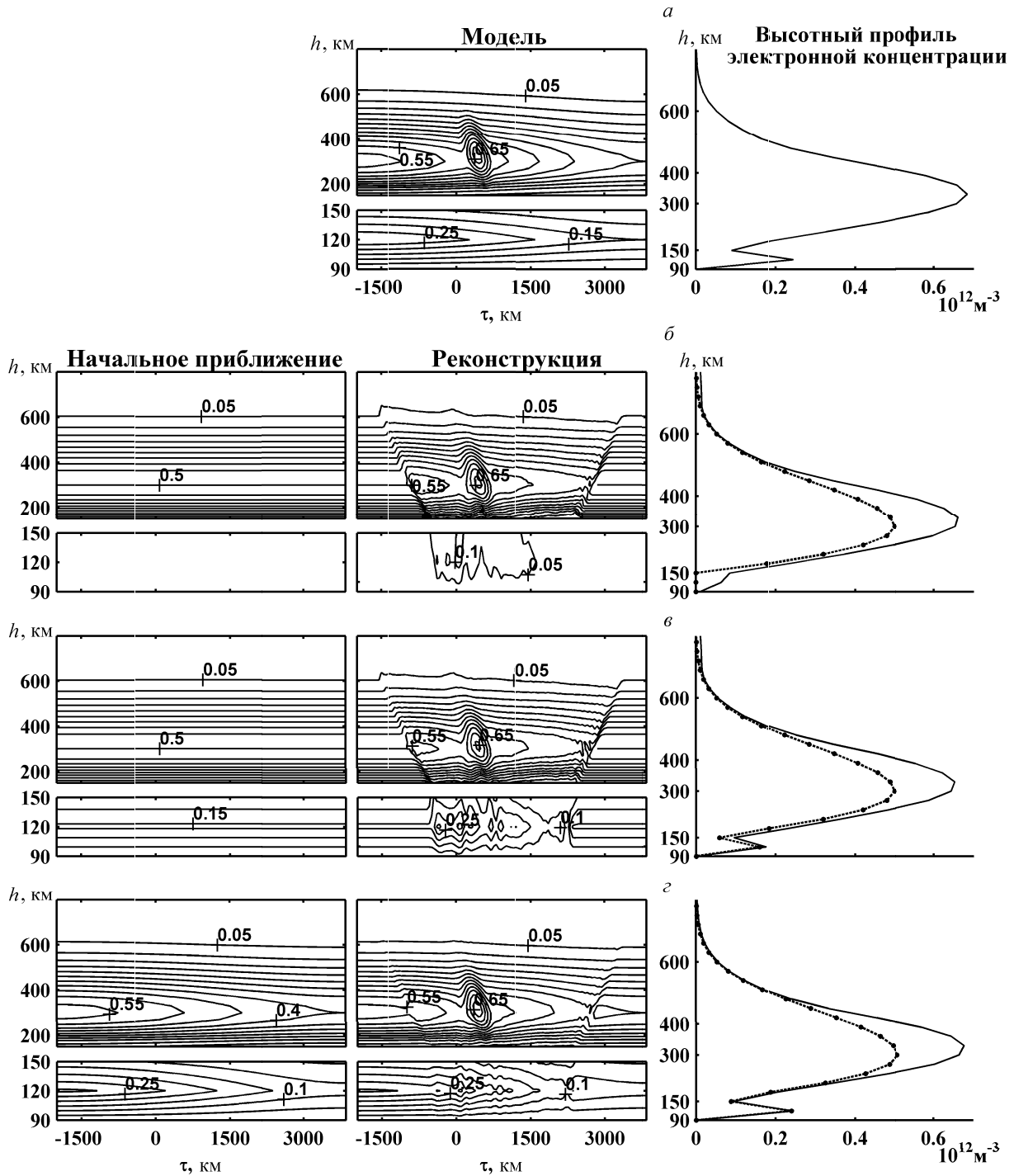


Рис. 2. Моделирование РТ-реконструкции структуры F - и E -областей ионосферы

На рис. 2, *а* слева изображена в изолиниях в единицах 10^6 эл/см^3 модель гладкой регулярной ионосферы с плавным убыванием значений электронной концентрации слева направо и изолированной наклонной неоднородностью (подобной ядру ЭА) в области максимума F -слоя в координатах h — высота и τ — расстояние по поверхности Земли. Для более детального представления распределения электронной концентрации в F - и E -областях приведены отдельно друг под другом для модели, начального приближения и реконструкции. Расстояние τ меня-

ется от -2000 км до 3850 км , границы изменения по h : для E -области от 90 до 150 км , для F -области от 150 до 1000 км . На рис. 2, *а* справа от модели показан профиль электронной концентрации, вычисленный по модельному распределению для координаты $\tau = -200 \text{ км}$. Далее на рис. 2, *б-г* сверху вниз показаны последовательные этапы реконструкции. Слева направо представлены: начальное приближение, соответствующая реконструкция и высотный профиль концентрации электронов, вычисленный по реконструкции (сплошная линия) и по начальному

приближению (штрих-пунктирная линия с точками). На первом этапе в качестве начального приближения выбираем гладкую однородную ионосферу с нулевыми значениями в области E (рис. 2, б), поскольку отсутствует априорная информация о восстанавливаемой функции. В полученной реконструкции начинает проявляться область E , что хорошо видно в профиле электронной концентрации (рис. 2, б). На следующем шаге процесса восстановления, учитывая уровень восстановленных значений электронной концентрации в области E на предыдущем шаге, задаем новое начальное приближение (рис. 2, в). Как видно из соответствующей реконструкции (рис. 2, в), слева края поднимаются вверх, что указывает на заниженный уровень значений слева в начальном приближении (т. е. значения в начальном приближении слева необходимо увеличить), а края справа, наоборот, опускаются вниз, т. е. уровень значений в начальном приближении справа завышен и его нужно уменьшить. Тем не менее E -область отчетливо идентифицируется, о чем свидетельствует профиль электронной концентрации (рис. 2, в). И наконец, окончательный вариант начального приближения представлен на рис. 2, г. На соответствующей реконструкции мало заметны краевые эффекты, восстановлены изолированная неоднородность в районе максимума F -слоя и распределение электронной концентрации в области E (рис. 2, г). Важно отметить, что в процессе восстановления никакого «растяжения» локализованной неоднородности в виде артефактов в нижние слои области E не происходит.

Рассмотрим более сложную модель ионосферы подобной «ребню» ЭА с «продавливанием» и «опусканием» нижнего края F -слоя ионосферы в E -область, как изображено на рис. 3, а слева. Высотные профили концентрации электронов вычислены для координаты $\tau = 100$ км. На рис. 3, б–г представлены последовательные шаги процесса реконструкции. На первом этапе процесса восстановления в качестве начального приближения выбираем гладкую однородную ионосферу с нулевыми значениями в E -области (рис. 3, б). В соответствующей реконструкции (рис. 3, б) восстановлено ядро ЭА с характерным наклоном и проявляется E -область, что отражает вычисленный по реконструкции профиль электронной концентрации (рис. 3, б). На следующем этапе задаем новое начальное приближение (рис. 3, в) с учетом уровня восстановленных значений электронной концентрации в области E на предыдущем шаге. В соответствующей реконструкции (рис. 3, в) по характеру краевых эффектов видно, что необходимо увеличить уровень начального приближения слева. Окончательный вариант начального приближения представлен на рис. 3, г. В полученной реконструкции все основные детали модельного распределения как в F -, так и E -областях восстановлены. Отчетливо виден «след» «продавливания» и «опускания» нижнего края F -слоя ионосферы в E -область. Про-

филь, вычисленный по реконструкции, совпадает с профилем, вычисленным по модельному распределению (рис. 3, а, г).

4. Примеры экспериментальных РТ реконструкций сечений E - и F -областей в районе экваториальной аномалии

Для представления экспериментальных результатов будем использовать систему координат: h в км (высота над поверхностью Земли) и географическую широту. На рис. 4 приведены в изолиниях (в единицах 10^6 эл/см³) примеры экспериментальных РТ сечений области северного «ребня» ЭА между Шанхаем и Манилой (геометрия данного РТ эксперимента приведена на рис. 1) для осени 1994 г. Здесь на 21°N – 24°N широтах находится северный «ребень» ЭА. Анализ экспериментальных данных по трассе Шанхай–Манила методом фазоразностной РТ позволил выявить ряд структурных особенностей ЭА в F -области [10, 14]. Сформировавшееся ядро ЭА в полуденные часы ориентировано вдоль направления магнитного поля Земли. Выявлена существенная асимметрия краев ЭА. Если с севера ЭА имеет достаточно выраженный закругленный квазисимметричный край, то экваториальный край ЭА изгибается вниз и напоминает структуру, подобную «хвосту» ядра аномалии. Обнаружены характерные чередующиеся области «сужение–расширение» верхнего края и толщины ионосферы в широтном диапазоне 15°N – 31°N [14]. Все перечисленные структурные особенности ЭА хорошо видны на реконструкциях на рис. 4.

Наблюдаемые устойчивые структурные особенности могут быть интерпретированы на основе анализа потоков и скоростей плазмы в районе ЭА, обусловленных фонтан-эффектом [14, 17]. Существующая восточно-западная компонента электрического поля и квазигоризонтальное магнитное поле в районе магнитного экватора приводят к вертикальному дрейфу плазмы с вертикальной и северной составляющими скорости. В северном направлении происходит увеличение потока плазмы, который приобретает все большую составляющую вдоль силовых линий магнитного поля. Здесь в области, где поток ориентирован почти вдоль линий, происходит увеличение плотности плазмы и образование ядра ЭА. Асимметрия ядра ЭА обусловлена тем, что если у северной границы ядра поток плазмы направлен вдоль силовых линий, то у южной границы ядра поток имеет поперечную магнитному полю направленную вверх компоненту, что приводит к «размазыванию» южной части ядра. Наличие направленной вверх компоненты потока с южной стороны ядра обуславливает образование «хвоста», в котором плазма втекает с юга и снизу в ядро ЭА. Вертикальная компонента потока плазмы в приэкваториальной области приводит к расширению ионосферы к северу. Последующее «загибание» к Земле силовых линий магнитного поля

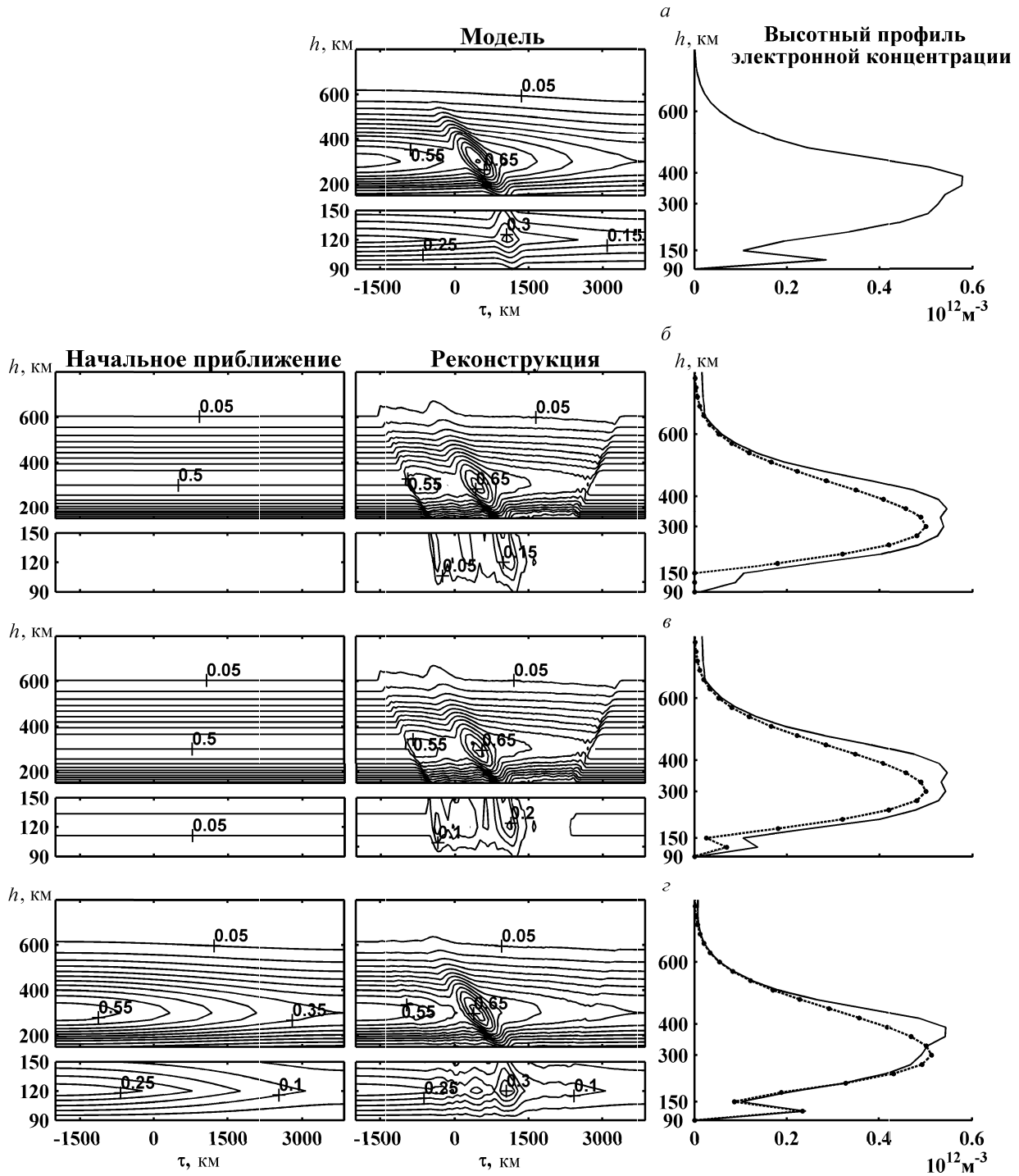


Рис. 3. Моделирование РТ-реконструкции структуры F - и E -областей ионосферы

приводит к «повороту» вниз потока плазмы, вдоль силовых линий и к сужению ионосферы. В области ядра ЭА происходит «продавливание» и «опускание» нижнего края ионосферного слоя под воздействием потока плазмы вдоль силовой линии, что отчетливо видно на представленных РТ-реконструкциях в E -области (h от 90 до 150 км) на широтах $24^\circ N$ – $28^\circ N$ (рис. 4). При этом необходимо заметить, что наблюдаемое в реконструкциях явление «продавливания» не является артефактом решения. Проведенное численное моделирование показало, что

ядро ЭА (модель на рис. 2, a) восстанавливается без «растяжения» в нижние слои E -области ионосферы. Если в модельном распределении ионосферы есть «продавливание» и «опускание» нижнего края F -слоя ионосферы в E -область (модель на рис. 3, a), то в реконструкции четко восстанавливаются эти структурные особенности модели. «Следы» «продавливания» и «опускания» нижнего края F -слоя ионосферы в E -область хорошо видны на реконструкции (рис. 3, z). В области «продавливания» и «опускания» нижнего края ионосферного слоя

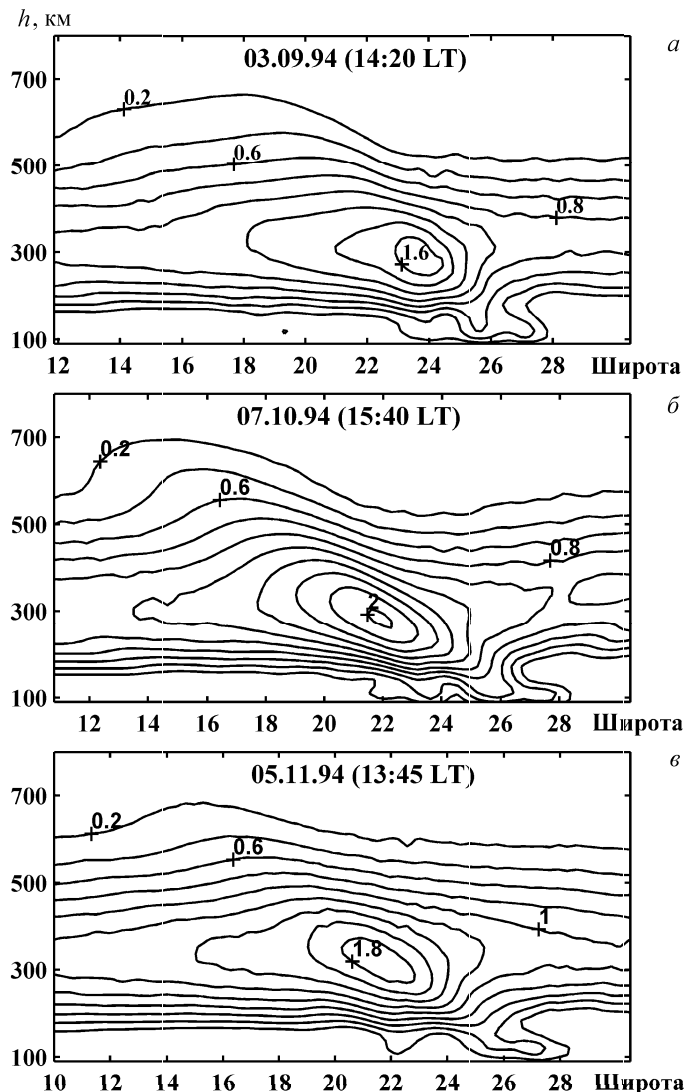


Рис. 4. Примеры экспериментальных РТ-сечений области северного «ребра» экваториальной аномалии между Шанхаем и Манилой по данным от 03.09.94, 14:20 LT (а); 07.10.94, 15:40 LT (б) и 05.11.94, 13:45 LT (в)

происходит, по-видимому, торможение плазмы и последующий дрейф в скрещенных полях со сменой направления дрейфа. Иными словами, происходит «поворот» потока плазмы почти на 90 градусов, т. е. движение преимущественно вдоль магнитного поля сменяется после торможения на движение поперек магнитного поля. Такая структура потока и приводит к образованию области типа «перетяжки», наблюдаемой после ядра ЭА на широтах 28° N– 31° N (рис. 4).

Заключение

На примерах численного моделирования и данных радиотомографического эксперимента в области экваториальной аномалии в Юго-Восточной Азии показана возможность восстановления структуры E -области ионосферы. Система приемников спутниковых сигналов по трассе Шанхай–Манила позволяет образовать систему пересекающихся лучей не только в F -области ионосферы, но и на более низких высотах в области E . Более того, поскольку размер

приемной системы составляет порядка 2000 км, то максимальное отклонение «дуги» цепочки приемников от прямой, соединяющей крайние приемники, достигает порядка 70 км. Поэтому учет кривизны Земли при построении томографической СЛУ и применение метода именно фазоразностной РТ как обладающего более высокой «чувствительностью» [10], а следовательно, и лучшим вертикальным разрешением по сравнению с другими подходами являются особенно важными при восстановлении структуры E -области ионосферы. Кроме того, анализ краевых эффектов в процессе реконструкции позволяет улучшить качество реконструкции и выявлять тонкие детали экваториальной аномалии на низких высотах. В частности, обнаружено в области ядра ЭА явление «продавливания» и «опускания» нижнего края ионосферного слоя под воздействием потока плазмы вдоль силовой линии магнитного поля Земли.

Автор выражает благодарность В. Е. Куницыну за обсуждение результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 04-05-64671).

Литература

1. Андреева Е. С., Куницын В. Е., Терещенко Е. Д. и др // Письма в ЖЭТФ. 1990. **52**. С. 145.
2. Foster J.C., Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. et al. // Int. J. Imaging Syst. Technol. 1994. **5**. P. 148.
3. Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Popov A.Ya., Razinkov O.G. // Ann. Geophys. 1995. **13**. P. 1263.
4. Kronschnable G.R., Bust G.S., Cook J.A., Vasicek C.J. // Radio Sci. 1995. **30**. P. 105.
5. Leitinger R. // Rev. Radio Sci. 1999. P. 581.
6. Mitchell, C.N., Jones D.G., Kersley L. et al. // Ann. Geophys. 1995. **13**. P. 1311.
7. Mitchell C.N., Kersley L., Heaton J.A. et al. // Ann. Geophys. 1997. **15**. P. 747.
8. Nygren T., Markkanen M., Lehtinen M. et al. // Ann. Geophys. 1996. **14**. P. 1422.
9. Andreeva E.S., Franke J.S., Kunitsyn V.E. et al. // Radio Sci. 2001. **36**. P. 299.
10. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. Ionospheric Tomography. Springer-Verlag, 2003.
11. Idenden D.W., Moffett R.J., Williams M.J. et al. // Ann. Geophys. 1998. **16**. P. 969.
12. Walker I.K., Heaton J.A.T., Kersley L. et al. // Ann. Geophys. 1996. **14**. P. 1413.
13. Pryse S.E. // Surveys in Geophysics. 2003. **24**. P. 1.
14. Andreeva, E. S., Franke J.S., Yeh K.C., Kunitsyn V.E. // Geophys. Res. Lett. 2000. **27**. P. 2465.
15. Андреева Е. С., Бербенева Н. А., Куницын В. Е. // Геомагнетизм и аэрономия. 1999. **39**, № 6. С. 109.
16. Андреева Е. С. // Радиотехн. и электроника. 2004. **49**, № 1. С. 5.
17. Moffett R.J. // Fundamentals of Cosmic Physics. 1979. **4**. P. 313.

Поступила в редакцию
17.07.03