

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 551.510.535, 550.388.2

РАДИОТОМОГРАФИЯ ИОНОСФЕРЫ НА БАЗЕ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ GPS/ГЛОНАСС

© 2011 г. В. Е. Куницын, И. А. Нестеров, А. М. Падохин, Ю. С. Туманова

Поступила в редакцию 29.09.2010 г.

Рассмотрены особенности задачи радиотомографии ионосферы по данным высокоорбитальных навигационных систем GPS/ГЛОНАСС. Предложен подход, основанный на поиске решения с минимальной соболевской нормой (наиболее гладкого решения). Проведено численное моделирование возможностей данного метода на реальной геометрии спутников и приемников высокоорбитальных навигационных систем, подтвердившее эффективность предложенного подхода в областях с развитой сетью приемников. Дана оценка разрешающей способности возможных радиотомографических систем на территории России. Приведены примеры радиотомографических реконструкций ионосферы, полученных по реальным высокоорбитальным данным для европейского региона.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием наземной сети приемников сигналов высокоорбитальных навигационных систем GNSS (Global Navigational Satellite Systems), расположенных по всему земному шару (сеть приемников IGS (International GNSS Service), информация с которых общедоступна, содержит более 1900 приемников) появилась возможность использовать непрерывные измерения параметров проходящих через ионосферу навигационных сигналов для регионального и глобального мониторинга распределения электронной концентрации в ионосфере. Ранее были развиты методы двумерной радиотомографии (РТ) ионосферы по данным сигналов низкоорбитальных спутников типа американской системы TRANSIT и российских систем “Цикада” и “Парус”. Метод фазовой РТ впервые предложен в работе [1], однако в [1] не решена задача определения неизвестной начальной фазы принимаемых радиосигналов. Первые экспериментальные реконструкции распределения электронной концентрации в ионосфере представлены в [2], где применен фазоразностный подход, не требующий в отличие от фазового подхода оценки неизвестной начальной фазы принимаемых радиосигналов. В настоящее время в мире известно более десяти низкоорбитальных РТ-систем, на которых проводятся эксперименты, их результаты описаны в [3–8].

Первые попытки использования радиосигналов высокоорбитальных навигационных спутников для исследований ионосферы описаны в [9, 10]. Основной проблемой в данном случае является возросшая размерность задачи и ее недоопределенность, что требует развития новых алгоритмов решения задачи. В последние годы задачи с высокой размерностью являются предметом исследований многих авторов, которые использовали различные подходы: от нейронных сетей до регуляризации [11–13], об-

зор этих методов представлен в [6]. Методы и результаты предложенные в данной работе являются продолжением исследований авторов [8, 12].

Исходными данными для задачи высокоорбитальной РТ являются измерения фазы радиосигнала (фазового пути) при прохождении пути от спутника до наземной станции приемника на двух рабочих частотах. Для системы GPS (Global Positioning System) эти частоты составляют $f_1 = 1575.42$ МГц и $f_2 = 1227.6$ МГц, для системы ГЛОНАСС (Глобальная Навигационная Спутниковая Система) – 1600 МГц и 1250 МГц. Соответствующие данные принято обозначать L_1 и L_2 – фазовые пути радиосигналов, измеренные в длинах зондирующих волн. Также можно использовать данные о псевдодальностях P_1 и P_2 (групповые пути радиосигналов), измеренных по времени распространения цуга волн на частотах f_1 и f_2 . По данным L_1 и L_2 , P_1 и P_2 можно определить полное электронное содержание ТЕС (Total Electron Content) вдоль траектории луча l спутник-приемник по следующим формулам:

$$\text{TEC} = \int_l N_e(\vec{r}) dl = \left(\frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + \text{const}, \quad (1)$$

$$\text{TEC} = \int_l N_e(\vec{r}) dl = \frac{P_2 - P_1}{K \left(\frac{1}{f_2^2} - \frac{1}{f_1^2} \right)}, \quad (2)$$

где $K = 40.308 \text{ м}^3/\text{с}^2$, $c = 3 \times 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света в вакууме, $N_e(\vec{r})$ – распределение электронной концентрации в ионосфере.

Таким образом, необходимо восстановить распределение электронной концентрации в ионосфере по набору линейных интегралов от этого распределения по набору лучей спутник-приемник.

Отметим, что по фазовым данным L_1 и L_2 можно вычислить ТЕС только с точностью до неизвестной аддитивной константы, которая не может быть определена в эксперименте с удовлетворительной точностью [8, 12]. Однако для восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере целесообразно использовать именно эти данные, так как ТЕС, вычисленное по данным P_1 и P_2 существенно зашумлено. Уровень шума составляет, как правило, 30...50%. При использовании фазоразностного подхода, позволяющего решать задачу по разности линейных интегралов по близким лучам, т.е. фактически по производным $d\text{ТЕС}/dt$ [3], нет необходимости оценивать неизвестную аддитивную константу в ТЕС, определенном по фазовым данным.

В связи с тем, что угловая скорость высокоорбитальных спутников мала и за время их пролета распределение электронной концентрации в ионосфере может измениться (в отличие от низкоорбитальной томографии, когда за время пролета спутника порядка 5...10 мин можно считать ионосферу неменяющейся), особенностью задачи по высокоорбитальным данным является необходимость учета времени как дополнительной переменной, после чего задача становится 4-мерной (три координаты + время). Другой особенностью задачи в данном случае являются ее высокая размерность и неполнота данных. Хотя число лучей приемник-спутник очень велико (на данный момент по всему миру насчитывается более 1900 непрерывно работающих приемников, а спутников системы GPS – 31, ГЛО-НАСС – 22), существуют области пространства, которые они не пересекают. В областях с малым числом приемников образуются зоны отсутствия данных.

Таким образом, необходимо провести моделирование ВОРТ-реконструкций распределения электронной концентрации в ионосфере в разных регионах в зависимости от числа и расположения принимающих станций и определить характеристики сети приемных станций в России, обеспечивающей требуемое качество томографических реконструкций ионосферы в регионе.

1. ПРЯМАЯ И ОБРАТНАЯ ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ ИОНОСФЕРЫ

Прямая задача моделирования восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере по данным GNSS заключается в вычислении наклонных ТЕС для модельного распределения электронной концентрации $N_{\text{мод}}$ в ионосфере:

$$\text{ТЕС}_i^{\text{мод}}(t) = \int_l N_{\text{мод}}(\varphi, \theta, h, t) dl. \quad (3)$$

Здесь φ, θ – долгота и широта, h – высота над землей, t – время. Набор лучей спутник-приемник l при этом определяется реальным положением приемников и спутников GNSS. В реальных спутниковых данных возможны периоды сбоев, а также скачки в данных L_1 и L_2 . Лучи спутник-приемник, соответствующие этим периодам, должны быть исключены из моделирования.

По данным о наклонном ТЕС, полученным в прямой задаче (3), может быть проведено восстановление модельного поля электронной концентрации и поля вертикального ТЕС.

Обратная задача восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере по данным GNSS заключается в определении пространственно-временного распределения электронной концентрации в ионосфере по набору интегралов по лучам от этого распределения. Таким образом, задача представляет собой систему интегральных уравнений для определения неизвестного поля $N_e(\vec{r}, t)$:

$$\text{ТЕС}_{l_i} + \text{const}_m = \int_{l_i} N_e(\vec{r}, t) dl, \quad (4)$$

$$i = 1, \dots, N, \quad m = 1, \dots, M,$$

где l_i – i -й луч из набора N лучей спутник-приемник, const_m – неизвестная аддитивная константа в ТЕС для m -го интервала непрерывности данных, соответствующего лучу l_i .

Поскольку задача является существенно недоопределенной (число приемников не может быть сколь угодно большим, и диапазон углов места спутников ограничен), методы аналитического обращения, в частности методы интегральных преобразований, не могут быть использованы. В данном случае необходимо либо использовать специфические методы томографической реконструкции, разработанные для задач с неполными данными, либо решать задачу в дискретной форме и применять алгебраические алгоритмы реконструкции.

Перепишем уравнение (4) в операторном виде с учетом типичного экспериментального шума ζ :

$$\hat{P}N = \text{ТЕС} + C + \zeta, \quad (5)$$

где $\hat{P}$ – проекционный оператор, переводящий пространственно-временное распределение N в одномерные проекции ТЕС, C – неопределенность в вычислении ТЕС. Проведем дискретизацию проекционного оператора $\hat{P}$, заменив его дискретным оператором $\hat{L}$. Тогда уравнение (5) примет вид

$$\hat{L}N = \text{ТЕС} + C + \zeta + E, \quad (6)$$

где E – ошибка аппроксимации, зависящая от решения коррелированная ошибка. При этом опе-

ратор $\hat{L}$ определяется выбором аппроксимации или представления искомой функции N . Однако в реальном эксперименте ошибка аппроксимации неизвестна, и мы фактически решаем другое уравнение:

$$\hat{L}N = \text{TEC} + C + \zeta, \quad (7)$$

неэквивалентное уравнению (6), и все ошибки и искажения, связанные с ошибкой аппроксимации E , будут проявляться в решении. Чем точнее оператор $\hat{L}$ приближает оператор $\hat{P}$, тем меньше ошибки аппроксимации E , однако никакие методы решения (7) не позволяют выделить особенности реконструкции N , вклад которых в данные TEC меньше ошибки аппроксимации E .

Для решения задачи (7) необходимо знать неопределенность вычисления TEC по фазовым данным C . Погрешности в оценке C могут привести к несогласованности данных и, как следствие, к низкому качеству реконструкций. В связи с этим в качестве входных данных удобнее использовать разности TEC на близких лучах (или разность TEC на текущем луче и первом луче) из одного интервала непрерывности данных для данной пары спутник-приемник. Это не требует оценки неопределенности C . Система уравнений с новым оператором $\hat{A}$ в таком случае формируется следующим образом [3, 8, 12]:

$$\begin{cases} \hat{L}N = \text{TEC} + C + \zeta, \\ \hat{L}'N = \text{TEC}' + C + \zeta', \end{cases} \quad (8)$$

$$\hat{A}N \equiv \hat{L}N - \hat{L}'N = \text{TEC} - \text{TEC}' + \tilde{\zeta},$$

где $\hat{L}N = \text{TEC} + C + \zeta$ – исходная система уравнений, $\hat{L}'N = \text{TEC}' + C + \zeta'$ – система уравнений, построенная по набору близких лучей $\tilde{\zeta}$ – экспериментальный шум в новой системе.

Построение проекционного оператора $\hat{L}$, а следовательно, и оператора $\hat{A}$ определяется путем выбора представления неизвестной функции $N_e(\vec{r}, t) = N_e(\varphi, \theta, h, t)$. Здесь могут быть использованы различные варианты задания пространственно-временного распределения (в частности, мультилинейная аппроксимация, аппроксимации сплайнами более высокого порядка, а также приближение толстого слоя с постоянной или переменной толщиной). Полученную систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) можно решать различными итерационными методами.

Решение СЛАУ вида (7), (8) для восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере является сложной вычислительной задачей. При типичном размере ячейки дискретизации (1° по долготе, 1° по широте, 1 ч по времени) и типич-

ном числе лучей для всех пар спутник-приемник за 1 день, используемом при восстановлении, порядка 200000 матрица задачи содержит порядка 10^{11} элементов, но является при этом достаточно разреженной. Это приводит к необходимости использования итерационных, а не прямых методов решения системы линейных уравнений. Помимо уменьшения объема необходимых вычислений важной особенностью итерационных методов является возможность учета априорной информации о неотрицательности решения (распределения электронной концентрации) на каждом шаге.

Существует большое число различных итерационных алгоритмов для решения СЛАУ [14]. Нами были использованы алгоритмы, хорошо работающие в задачах 2D низкоорбитальной томографии ионосферы. Рассмотрим подробнее эти алгоритмы.

Для системы линейных уравнений $\hat{A}\vec{x} = \vec{y}$ итерационные методы типа ART:

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k + \lambda_k \frac{y_i - (\vec{a}_i, \vec{x}^k)}{(\vec{a}_i, \vec{a}_i)} \vec{a}_i, \quad (9)$$

или SIRT:

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k + \sum_i \rho_i \frac{y_i - (\vec{a}_i, \vec{x}^k)}{(\vec{a}_i, \vec{a}_i)} \vec{a}_i \quad (10)$$

сходятся к нормальному решению относительно начального приближения $\vec{x}^0$, т.е. к решению задачи

$$\min_{\vec{A}\vec{x} = \vec{y}} \|\vec{x} - \vec{x}^0\|^2, \quad (11)$$

где норма является евклидовой. Здесь $\vec{x}^k$ и $\vec{x}^{k+1}$ – приближенное решение на k -м и $(k+1)$ -м шаге итераций соответственно; $\vec{a}_i$ – вектор, состоящий из элементов i -й строки матрицы $\vec{A}$; ρ_i и λ_k – весовые множители.

Особенностью задачи является ее недоопределенность. Существуют конечные пространственно-временные элементы разбиения исследуемой области, которые не пересекают ни один луч спутник-приемник. Известно несколько подходов для решения этой проблемы. Можно использовать процедуру интерполяции решения в области отсутствия данных. Этот подход эффективен в регионах с густой сетью станций (Западная Европа, США) [8, 12], но не применим для получения глобальных полей электронной концентрации. Другим подходом, используемым в данной работе, является поиск среди бесконечного множества решений недоопределенной задачи наиболее гладкого решения, минимизирующего некоторую соболевскую норму (в отличие от евклидовой нормы в (11)) и обеспечивающего интерполяцию решения в области отсутствия данных. Минимизируемую норму порождает скаляр-

ное произведение, используемое в формулах, задающих итерации. Если использовать скалярное произведение, соответствующее некоторой матрице L :

$$(\dot{z}, \dot{x})_L = (\dot{z}, L^* L \dot{x}), \quad (12)$$

то итерационный алгоритм SIRT с весами

$$\rho_i = \frac{(\dot{a}_i, (L^* L)^{-1} \dot{a}_i)}{\sum_j (\dot{a}_j, (L^* L)^{-1} \dot{a}_j)} \quad (13)$$

можно записать в виде

$$\dot{x}^{k+1} = \dot{x}^k + t(L^* L)^{-1} \sum_i \dot{a}_i(y_i(\dot{a}_i, \dot{x}^k)). \quad (14)$$

Вычислительная эффективность алгоритма (14) зависит от простоты решения системы уравнений с матрицей $L^* L$. Для соболевских норм эта матрица имеет ленточную структуру. В случае равномерных прямоугольных сеток для решения этого уравнения может быть применен метод Фурье.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В данной работе в качестве модельного распределения электронной концентрации использована модель толстого слоя постоянной толщины. Электронная концентрация на высоте максимума слоя задана пропорционально косинусу зенитного угла Солнца данной точки. Глобальные неоднородности распределения электронной концентрации (экваториальная аномалия и главный ионосферный провал) качественно заданы в распределении электронной концентрации на высоте максимума слоя в виде эллиптических неоднородностей соответствующего размера. В модель можно вводить локальные неоднородности, также заданные на высоте максимума слоя. Для моделирования влияния числа и положения приемников GNSS-сигналов на результаты РТ-реконструкций одну и ту же систему локальных неоднородностей (максимумов и минимумов) размещали над регионами, характеризующимися различным числом и плотностью приемников GNSS-сигналов. Для моделирования были выбраны два региона, один из которых, Европа, характеризуется достаточно большой плотностью сети приемников GNSS-сигналов. Другой регион – азиатская часть территории России. Здесь сеть приемников GNSS-сигналов имеет порядка десяти приемных станций. Решали прямую и обратную задачи моделирования и результаты томографических реконструкций сравнивали с модельным распределением.

Рассмотрим результаты моделирования для Европейского региона. В модель вводили систему из

шести локальных неоднородностей разных размеров. Модельное распределение вертикального TEC для момента времени $T = 11:00$ UT (Universal Time) для этого региона показано на рис. 1а. Прямую задачу моделирования решали для реальной геометрии спутников и приемников GNSS на 1 августа 2008 г. Ошибки по правой части при решении задачи реконструкции составили 2% в метрике L_2 . Результаты реконструкции вертикального TEC для 11:00 UT для Европы показаны на рис. 1б.

Видно, что число и расположение приемников в Европе позволяют восстанавливать положение и пространственные размеры всех локальных неоднородностей. Хуже всего восстанавливаются параметры высокоширотной неоднородности с центром (60° с.ш., 5° з.д.), что обусловлено недостаточным числом приемников в этой области. Отметим также некоторую недооценку максимальных значений неоднородностей по данным реконструкции. В целом ошибка восстановления для данной области не превышает 15%. Аналогичные результаты можно получить и для Северо-Американского региона.

Иная картина наблюдается при моделировании восстановления схожей системы из трех локальных неоднородностей над Россией (рис. 2). Неоднородности, расположенные над территорией России, практически не восстанавливаются, что обусловлено отсутствием пересечений области реконструкции лучами спутник-приемник из-за недостаточного числа российских GNSS-приемников в сети IGS. Поэтому для достижения приемлемого качества томографических реконструкций необходимо существенно увеличить число GNSS-приемников на территории России. Отдельно следует отметить, что для мониторинга и исследований высокоширотной ионосферы, например исследований главного ионосферного провала, в сети приемников должно присутствовать достаточно большое число станций, расположенных на широтах выше характерной широты образования провала.

Также было проведено моделирование результатов томографических реконструкций при условии установки приемников GNSS на метеопосты Всемирной Метеорологической Организации WMO (World Meteorological Organization), находящиеся на территории России (933 метеопоста по данным на ноябрь 2008 г.).

Размещение приемников на метеопостах WMO позволило бы существенно улучшить качество реконструкций. При этом, как показало проведенное нами моделирование, не обязательно оснащать каждый пост WMO GNSS-приемником. Результат реконструкции TEC для модели, показанной на рис. 2, при размещении приемников GNSS на 100 метеопостах в России таким образом, что каж-

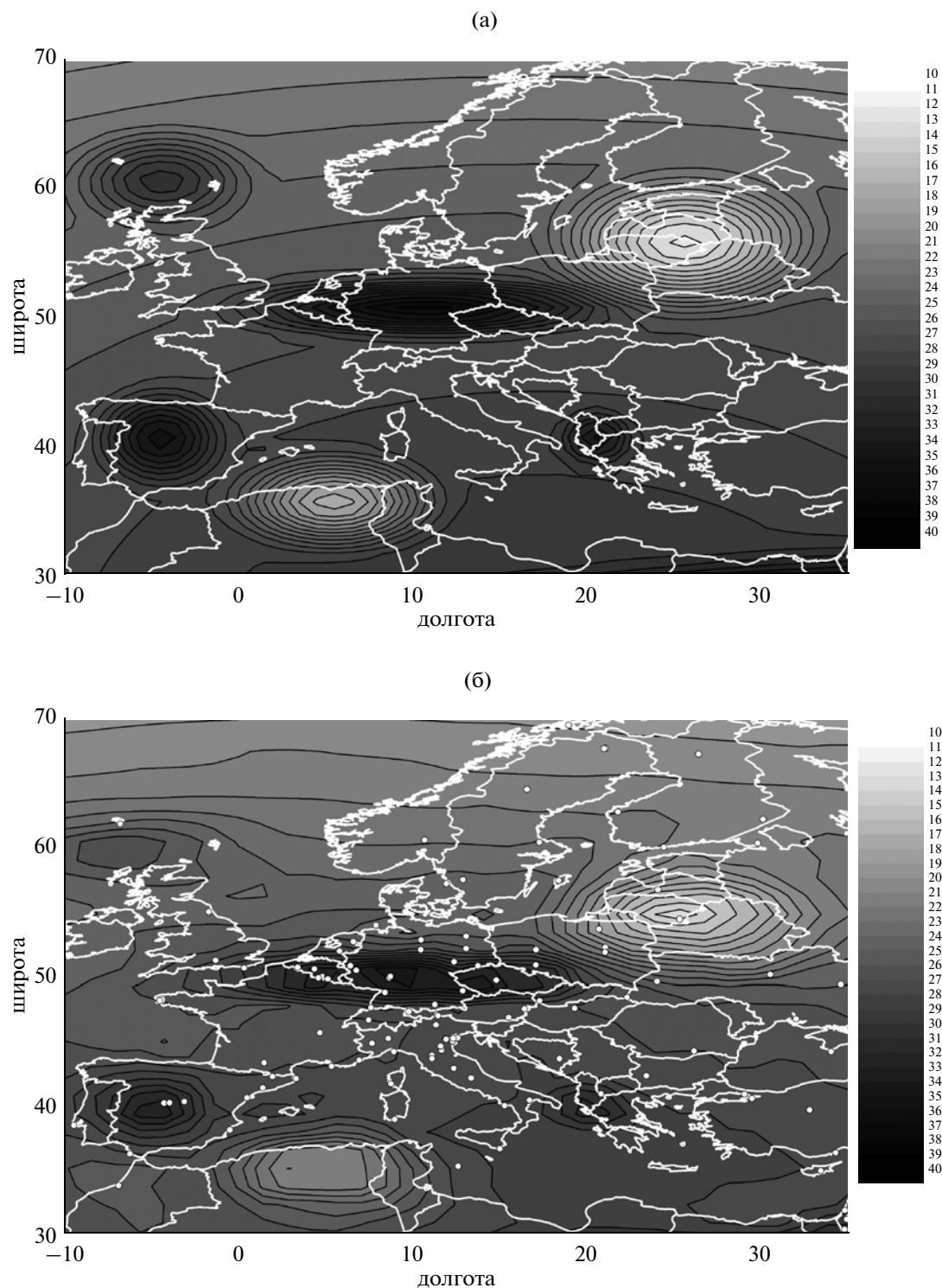


Рис. 1. Распределение ТЕС над Европой: а – модель, б – результат реконструкции, где светлыми точками показаны станции IGS. Тоновая шкала дана в единицах TECU ($1\text{TECU} = 10^{16}\text{ м}^{-2}$).

дый пункт наблюдения отстоит от соседних не менее чем на 400 км, приведен на рис. 3. Видно, что даже такое сравнительно небольшое увеличение числа приемников в регионе позволяет восстанавливать положения всех модельных неоднородностей. В то

же время сохраняется некоторая (порядка 10...15%) недооценка их максимальных значений.

Вопрос о разрешающей способности высокоорбитальных РТ-систем был специально исследован.

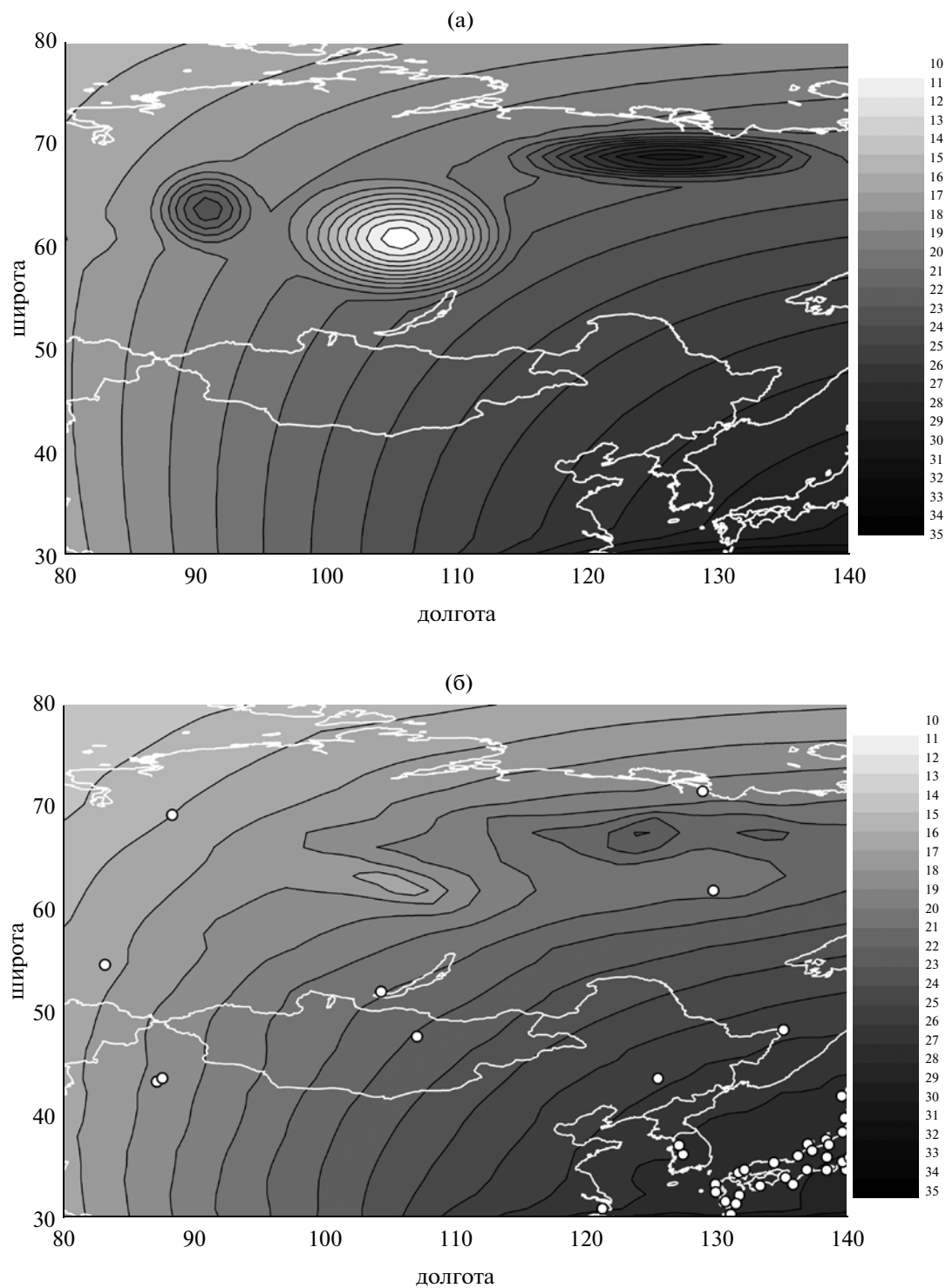


Рис. 2. Распределение ТЕС над территорией России: а – модель, б – результат реконструкции, где светлыми точками показаны станции IGS. Тоновая шкала дана в единицах TECU ($1\text{TECU} = 10^{16}\text{ м}^{-2}$).

Для этого использовали набор модельных распределений электронной концентрации, имеющих вид равномерных (по широте и долготе) “сеток” локальных неоднородностей заданного масштаба, ре-

конструируемых по данным всей сети IGS. Пример “сетки” с масштабом неоднородностей 4° приведен рис. 4. Глобальные реконструкции для этого распределения представлены на рис. 5.

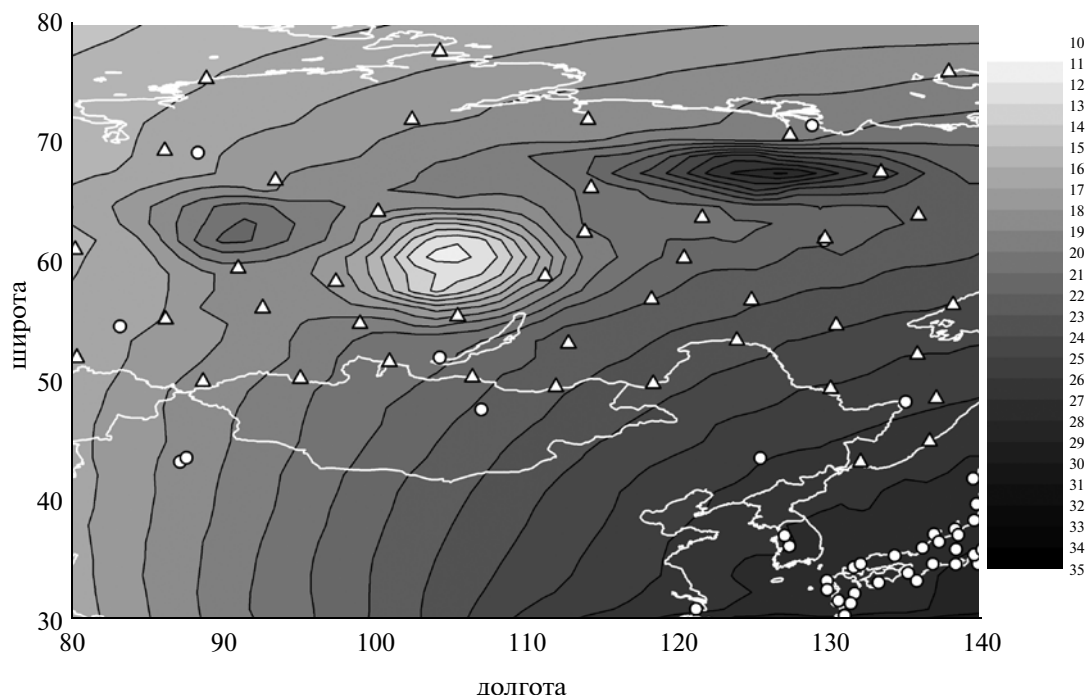


Рис. 3. Реконструкция модельного распределения ТЕС над территорией России, показанного на рис. 2, при дополнительном использовании приемников, расположенных на 100 постах WMO. Тоновая шкала дана в единицах TECU ($1\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Светлыми точками обозначены существующие приемники сети IGS, треугольниками — посты WMO, на которых можно разместить приемники.

Под разрешающей способностью понимаем здесь характерный размер “пятна” неоднородности, которое восстанавливается, не сливаясь с окружающими. Если восстанавливаются элементы структуры на рис. 4, то в регионе достигается разрешающая способность не хуже, чем 4° .

Разрешающую способность в 2° обеспечивают только сети станций IGS в Европе и США. К разрешающей способности в 4° приближается сеть станций в районе Юго-Восточной Азии — Австралии — Новой Зеландии. Сеть станций в России недостаточно развита для изучения структур таких масштабов. Относительно простым способом увеличения этой сети является установка GNSS-приемников на существующих метеопостах WMO. При использовании 933 метеостанций WMO на территории России можно достичь разрешающей способности в 2° ; в то же время при использовании даже небольшой части этой сети (100 станций, распределенных относительно равномерно) обеспечивается разрешающая способность в 4° (рис. 6).

Заметим, что уменьшение разрешающей способности по долготе, наблюдаемое в приполярных областях, связано с пространственной неоднородностью сетки географических координат. Уже на 60° широты реальный масштаб неоднородности по долготе уменьшается в два раза. Таким образом, удовлетворительное восстановление локальных не-

однородностей в этой области, наблюдаемое на рис. 5, означает наличие двукратного запаса по разрешающей способности.

3. СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ВЫСОКООРБИТАЛЬНОЙ РАДИОТОМОГРАФИИ С ДАННЫМИ ИОНОЗОНДОВ

Эффективность разработанных методов ВОРТ подтверждают многочисленные результаты сравнений полученных реконструкций с данными ионозондов. Приведем примеры таких сравнений по критическим частотам F2-слоя (f_0F2) в регионе Северной Америки для двух периодов: слабо возмущенной ионосферы (18–20 сентября 2010 г.) и сильной геомагнитной бури (29 октября – 1 ноября 2003 г.)

В период 18–20 сентября 2010 г. результаты ВОРТ-реконструкции были сопоставлены по f_0F2 с данными девяти ионозондов. Поскольку периодичность измерений ионозонда, как правило, составляет 15 мин, то сравнение критических частот проводили примерно по 2600 точкам. На рис. 7 приведены типичные графики зависимости от времени критической частоты, полученной по результатам ВОРТ-реконструкции и измеренной четырьмя выбранными для примера ионозондами: Boulder (40° с.ш., 105.3° з.д.), Gakona (62.4° с.ш., 145° з.д.),

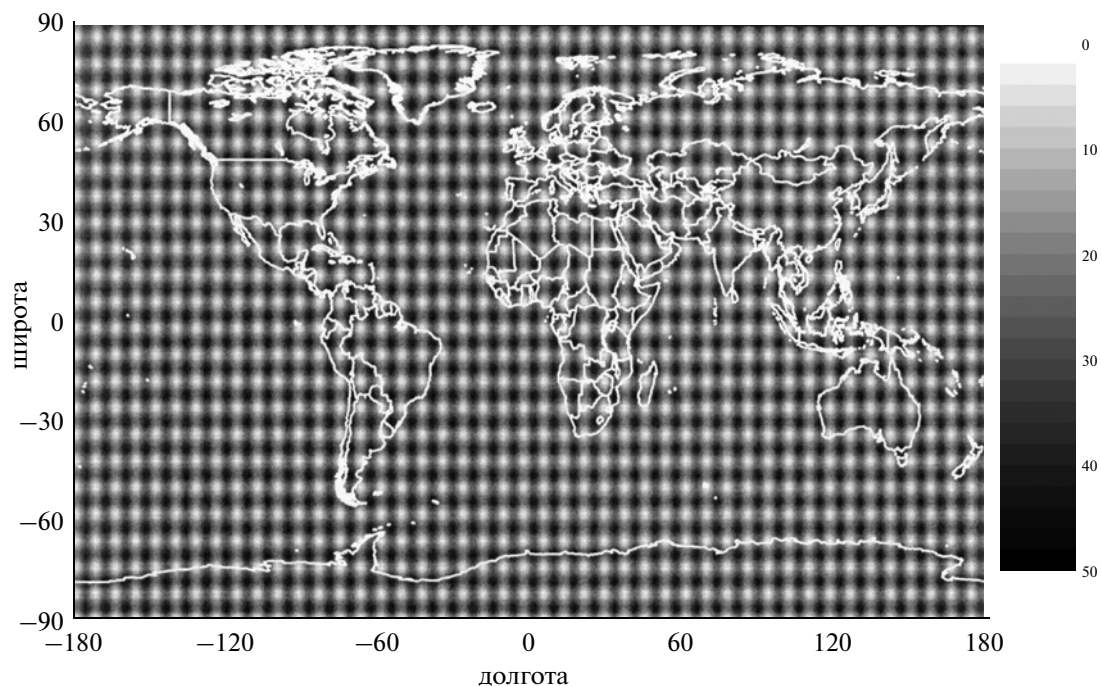


Рис. 4. Модельное распределение ТЕС (“сетка”) с характерным размером неоднородностей 4° . Тоновая шкала дана в единицах TECU ($1\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$).

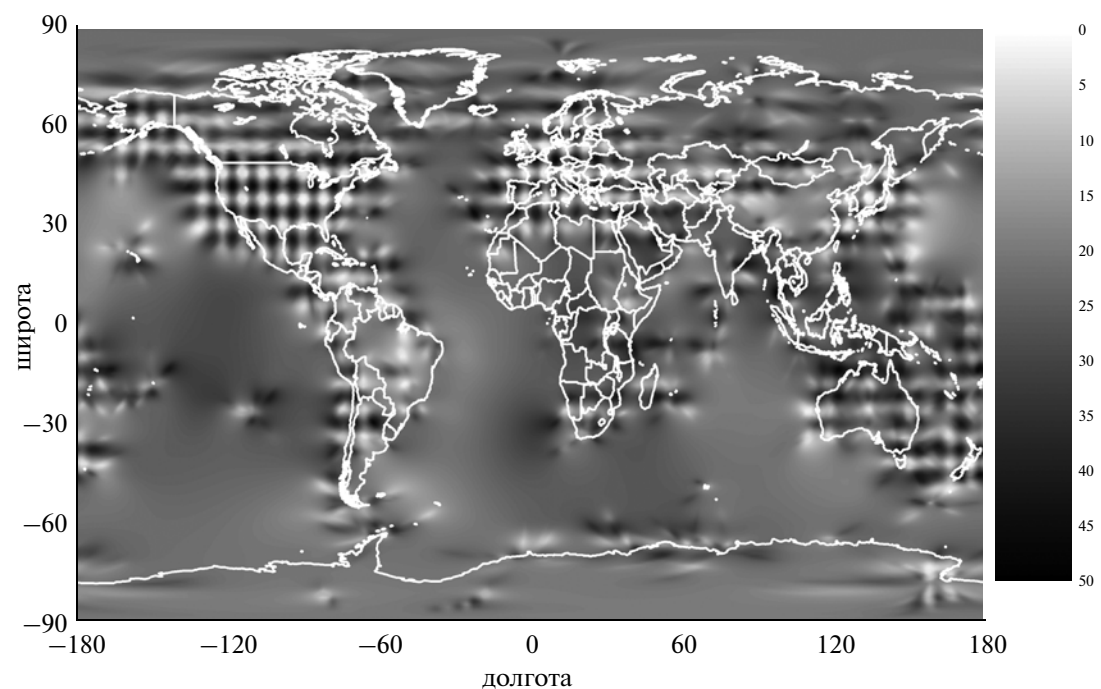


Рис. 5. Реконструкция модельного распределения ТЕС, показанного на рис. 4. Тоновая шкала дана в единицах TECU ($1\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$).

Millstone Hill (42.6° с.ш., 71.5° з.д.) и Wallops Is (37.8° с.ш., 75.5° з.д.) 19 сентября 2010 г. Как видно из рис. 7, в невозмущенной или слабо возмущенной ионосфере разница между критическими частота-

ми, измеренными ионосферными станциями и вычисленными из вертикальных профилей электронной концентрации, полученных при РТ-реконструкции, как правило, не превышает 1 МГц.

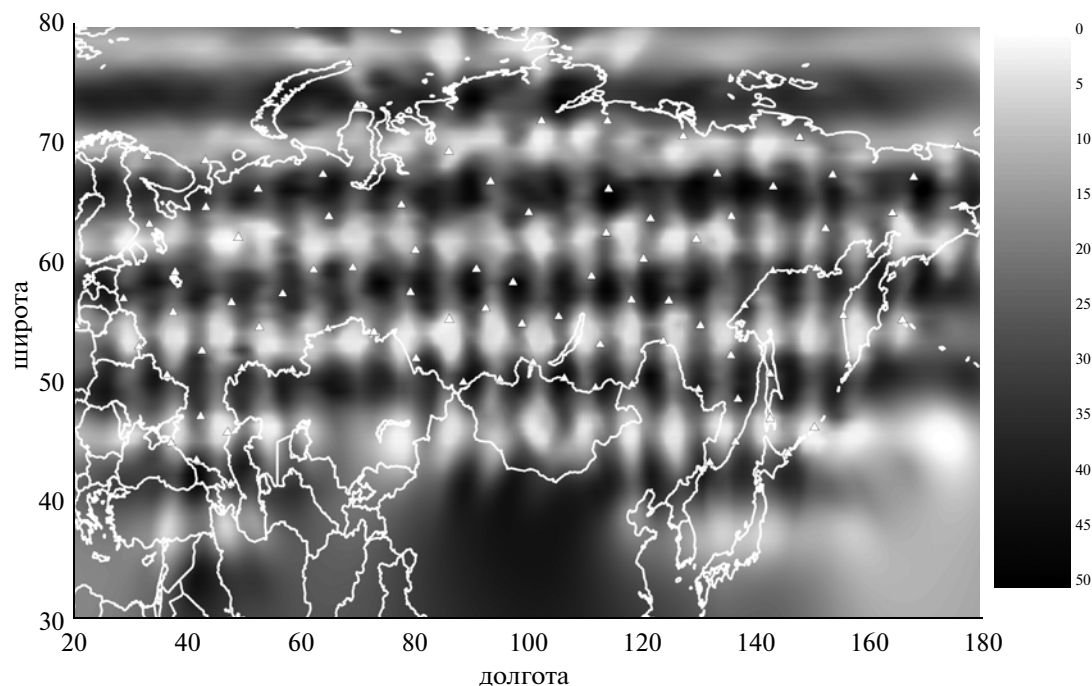


Рис. 6. Реконструкция модельного распределения ТЕС над территорией России, показанного на рис. 4, при дополнительном использовании приемников, расположенных на 100 постах WMO. Тоновая шкала дана в единицах TECU ($1\text{TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). Треугольниками обозначены посты WMO, на которых можно разместить приемники.

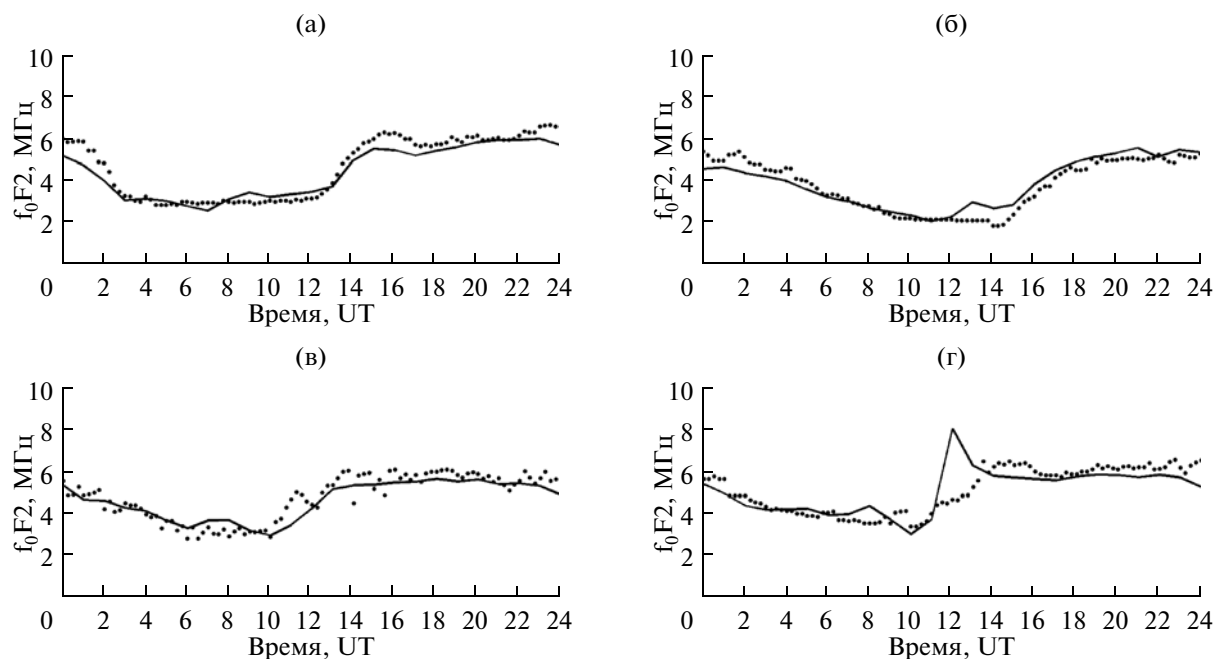


Рис. 7. Сопоставление значений f_0F_2 , вычисленных по РТ-реконструкциям (сплошные линии), с данными ионозондов (точки) Boulder (а), Gakona (б), Millstone Hill (в), Wallops Is (г) 19 сентября 2010 г.

Для всего рассматриваемого периода были вычислены среднеквадратичные отклонения (СКО) разницы f_0F_2 по данным рассматриваемых ионозондов и ВОРТ-реконструкций, составляющие в среднем 0.6 МГц. Коэффициенты корреляции меж-

ду измерениями ионозондов и данными ВОРТ-реконструкции, как правило, составляют 0.88...0.98.

В период геомагнитной бури в конце октября 2003 г. нередко наблюдались сбои в работе многих ионозондов. Тем не менее для работающих в период

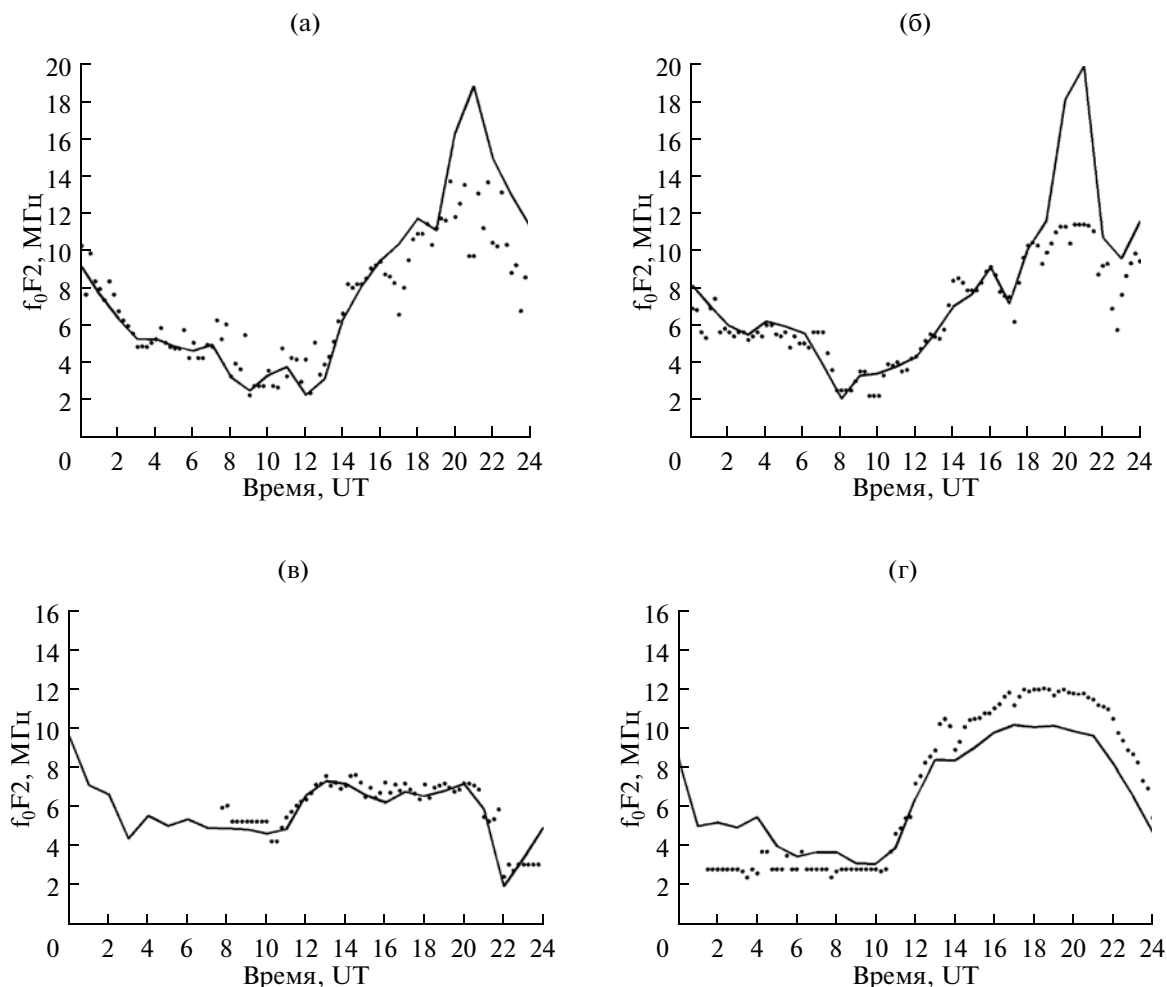


Рис. 8. Сопоставление значений f_0F2 , вычисленных по РТ-реконструкциям (сплошные линии), с данными ионозондов (точки) Dyess (а), Eglin AFB (б) 29 октября 2003 г. и с данными ионозондов Goosebay (в), Millstone Hill (г) 31 октября 2003 г.

бури ионозондов наблюдается хорошее соответствие измеренных критических частот с рассчитанными по результатам ВОРТ. В рассматриваемый период сравнение проводилось с измерениями 11 ионозондов. Таким образом, сопоставление по критическим частотам результатов ВОРТ-реконструкции с данными ионозондов было проведено примерно по 7500 точкам. На рис. 8 представлены графики зависимости критических частот от времени UT 29 октября 2003 г. (Kp -индекс достигал максимально возможного значения 9) и 31 октября 2003 г. (Kp -индекс находился в пределах от 4...8). На рис. 8 в качестве примера 29 октября были выбраны ионозонды Dyess (32.4° с.ш., 99.7° з.д.) и Eglin AFB (30.4° с.ш., 86.7° з.д.), а 31 октября 2003 г. — ионозонды Goosebay (53.3° с.ш., 60.4° з.д.) и Millstone Hill (42.6° с.ш., 71.5° з.д.).

Значения критических частот по результатам ВОРТ в большинстве случаев отличаются от изме-

ренных ионозондами на 2...3 МГц. СКО разницы f_0F2 по данным ионозондов и ВОРТ-реконструкций в период бури в конце октября 2003 г. составляет для выбранного набора ионозондов в среднем 1.9 МГц. Здесь следует также отметить, что в возмущенные периоды значительно возрастает электронная концентрация в области D и поглощение радиоволн и, как следствие, на многих ионограммах отсутствуют следы отраженных сигналов. Кроме того, в периоды бурь возникает большое число неоднородностей, которые приводят к многолучевости отраженного сигнала и сильным вариациям действующих высот, что заметно снижает точность ионозонда. В задаче ВОРТ поглощением можно пренебречь из-за высокой частоты зондирования, что позволяет исследовать структуру ионосферы как в спокойные периоды, так и в периоды сильных гелиогеофизических возмущений, когда в измерениях многих ионозондов присутствуют пропуски

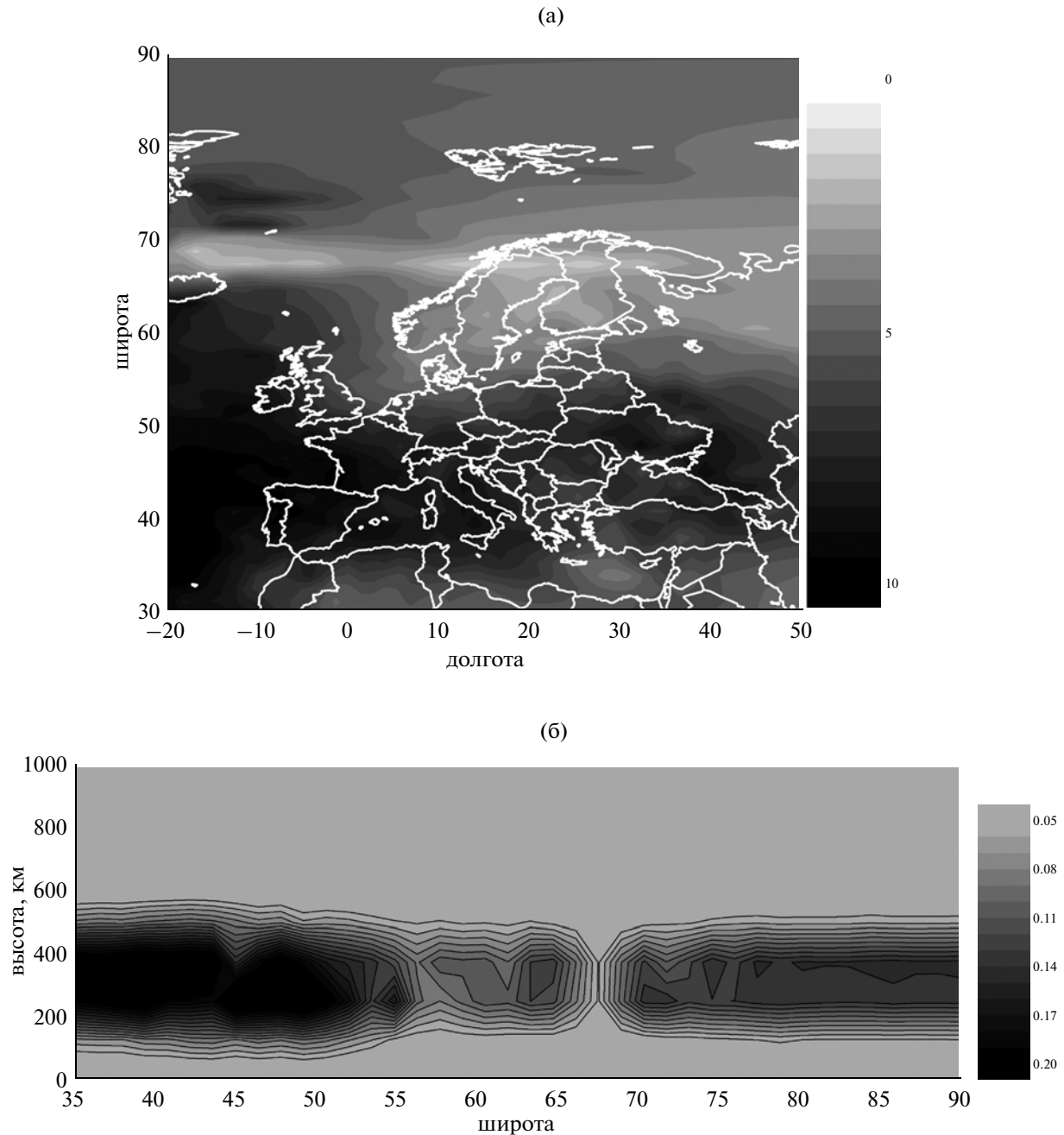


Рис. 9. Реконструкции параметров главного ионосферного провала 8 марта 2010 г. 20:00 UT: а – распределение ТЕС над Европой, тоновая шкала дана в единицах TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$), б – высотнo-широтное распределение электронной концентрации, тоновая шкала дана в N –единицах, $1 \text{ N ед.} = 10^{12} \text{ м}^{-3}$) над Европой вдоль 12° в.д.

данных. Например, в измерениях ионозондов Goosebay и Millstone Hill на рис. 8 при отсутствии отраженного сигнала в данных сохраняется предыдущее измеренное значение критической частоты. Результаты РТ хорошо соответствуют данным ионозондов в областях с достаточно плотной сетью GNSS-приемников.

4. ПРИМЕРЫ РЕАЛЬНЫХ РЕКОНСТРУКЦИЙ

Приведем примеры использования описанного подхода на реальных данных. На рис. 9 представлена реконструкция ионосферы над Европой 8 марта 2010 г., 20:00 UT. На рисунке отчетливо виден главный ионосферный провал на широте $\sim 67^\circ$ шириной

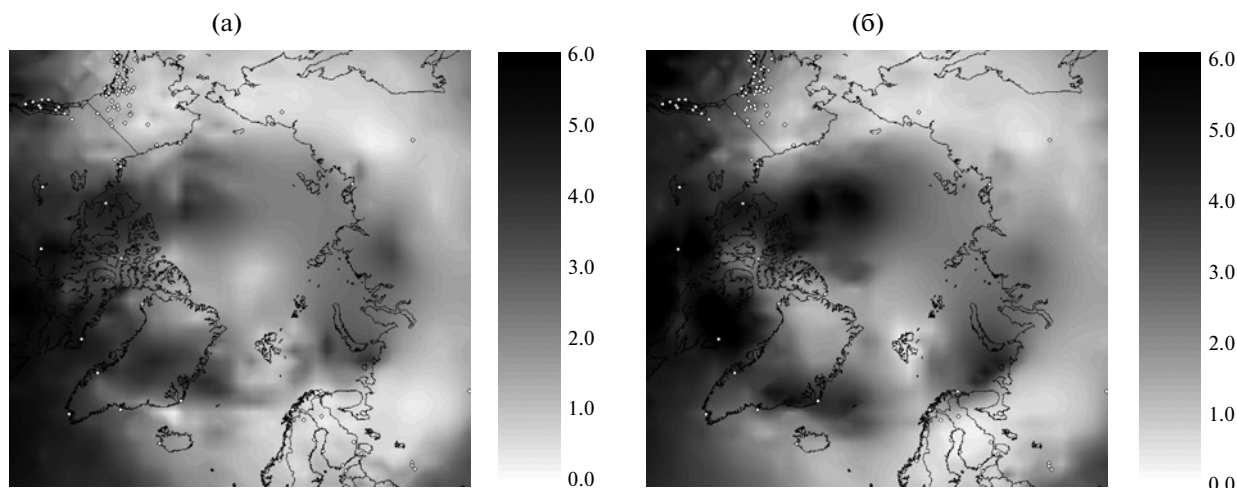


Рис. 10. Реконструкция распределения ТЕС над регионом Арктики 16 декабря 2006 г.: а – 18:00 UT; б – 19:00 UT. Тоновая шкала дана в единицах TECU ($1\text{TECU} = 10^{16}\text{ м}^{-2}$).

около 5° . Уменьшение электронной концентрации в провале достигает 30%. На рис. 10 приведен пример реконструкции ионосферы над Арктикой 16 декабря 2006 г. Здесь видна характерная кольцеобразная структура вокруг северного полюса, связанная с конвекцией и переносом электронной концентрации с дневной стороны ионосферы на ночную. Примеры реконструкций распределения электронной концентрации в ионосфере, полученные при использовании описанного в работе подхода даны также в [15, 16].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе модельных распределений и реальной геометрии спутников и приемников решена прямая задача высокоорбитальной радиотомографии ионосферы и проведено численное моделирование. Решение, полученное в прямой задаче высокоорбитальной радиотомографии, использовалось в качестве входных данных обратной задачи восстановления электронной концентрации. Показано, что решение обратной задачи высокоорбитальной радиотомографии и точность восстановления модельного распределения электронной концентрации сильно зависят от числа и положения приемников и спутников. Изученно влияние плотности сети приемных станций на разрешающую способность высокоорбитальной радиотомографии.

Выявлена непригодность современного российского сегмента сети станций IGS для осуществления радиотомографического мониторинга в регионе. Для улучшения качества реконструкций над Россией необходимо создать сеть приемных станций, сопоставимую если не с американской или европейской сетью, то, по крайней мере, с сетью при-

емников в Юго-Восточной Азии. Как показали результаты моделирования, для того чтобы достигнуть пространственного разрешения реконструкций в 4° , над территорией России необходимо разместить около 100 приемников на метеопостах WMO. Установка GNSS-приемников на большей части существующих метеопостов (~1000) позволит достигнуть пространственного разрешения реконструкций в 2° .

Также приведены примеры реконструкции ионосферы в европейском регионе с главным ионосферным провалом и реконструкции ионосферы над Арктикой. Результаты модельных исследований и реконструкций по реальным данным, а также сравнение с данными ионизационных зондов показали эффективность описанного подхода для реконструкции 4D пространственно-временных распределений электронной концентрации в ионосфере по данным высокоорбитальных навигационных систем.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 11-05-01157 и 10-05-01126), а также ФЦП “Научные и научно-педагогические кадры современной России” (проект НК-56П/24 ГК № П167) и Министерства образования и науки РФ (проект 14.740.11.0203).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Austen J., Franke S., Liu C. // Radio Sci. 1988. V. 23. № 3. P. 299.
2. Андреева Е.С., Галинов А.В., Куницын В.Е. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52. № 3. С. 783.
3. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991.

4. *Leitinger R.* // Review of Radio Science 1996–1999 / Ed. by Ross Stone W. N.Y.: Wiley-IEEE Press, 1999. P. 581.
5. *Pryse S.E.* // Surveys in Geophysics. 2003. V. 24. № 1. P. 1.
6. *Bust G.S., Mitchell C.N.* // Reviews in Geophysics. 2008. V. 46. № 2. P. RG1003.
7. *Kunitsyn V., Tereshchenko E.* Ionospheric Tomography. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
8. *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007.
9. *Hajj G.A., Ibanezmeier R., Kursinski E.R., Romans L.J.* // Int. J. Imaging System Technology. 1994. V. 5. № 2. P. 174.
10. *Ruis A., Ruffini G., Cucurull L.* // Geophys. Res. Lett. 1997. V. 24. № 18. P. 2291.
11. *Cornely P.-R.J., Kuklinski W.S.* // Radio Sci. 2005. V. 40. № 5. P. RS5S90.
12. *Куницын В.Е., Андреева Е.С., Кожарин М.А., Нестеров И.А.* // Вестн. МГУ. Сер. 3. Физика, астрономия. 2005. № 1. С. 74.
13. *Ma X.F., Maruyama T., Ma G., Takeda T.* // J. Geophys. Res. V. 110. № A5. P. A05308.
14. *Sensor Y.* // Proc. IEEE. 1983. V. 71. № 3. P. 409.
15. *Куницын В.Е., Терещенко Е.С., Андреева Е.С., Нестеров И.А.* // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180. № 5. С. 548.
16. *Nesterov I.A., Kunitsyn V.E.* // J. Adv. Space Res. 2011. V. 47. № 10. P. 1789.