

15. Васильев М Б и др. *ДАН СССР* **218** 1298 (1974) [Vasil'ev M B et al. *Sov. Phys. Dokl.* **19** 629 (1975)]
16. Савич Н А и др. *Радиотех. и электрон.* **31** 433 (1986)
17. Савич Н А и др. *Радиотех. и электрон.* **31** 2113 (1986)
18. Гаврик А Л, Гаврик Ю А, Самознаев Л Н *РЭ* **53** 1104 (2008) [Gavrik A L, Gavrik Yu A, Samaznaev L N *J. Commun. Technol. Electron.* **53** 1044 (2008)]
19. Васильев М Б и др. *ДАН СССР* **212** 67 (1973) [Vasil'ev M B et al. *Sov. Phys. Dokl.* **18** 566 (1974)]
20. Савич Н А и др. *Письма в Астрон. журн.* **12** 675 (1986) [Savich N A et al. *Sov. Astron. Lett.* **12** 283 (1986)]
21. Андреев В Е, Гаврик А Л *Письма в Астрон. журн.* **19** 12 1081 (1993) [Andreev V E, Gavrilik A L *Pis'ma Astron. Zh.*
22. Андрианов В А, Смирнов В М *Радиотех. и электрон.* **38** 1326 (1993)
23. Смирнов В М *Радиотех. и электрон.* **46** 47 (2001) [Smirnov V M *J. Commun. Technol. Electron.* **46** 41 (2001)]
24. Смирнов В М и др. *Радиотех. и электрон.* **53** 1112 (2008) [Smirnov V M et al. *J. Commun. Technol. Electron.* **53** 1052 (2008)]
25. Кучерявенков А И, Яковлев О И, Кучерявенкова И Л, Самознаев Л Н *Радиотех. и электрон.* **43** 945 (1998) [Kucheryavenkov A I, Yakovlev O I, Kucheryavenkova I L, Samaznaev L N *J. Commun. Technol. Electron.* **43** 880 (1998)]
26. Pavelyev A et al. *Radio Sci.* **37** 1043 (2002)
27. Pavelyev A G et al. *J. Geophys. Res.* **112** A06326 (2007)
28. Павельев А Г, Викерт Й, Лиу Й *Изв. вузов. Радиофизика* **51** 1 (2008) [Pavelyev A G, Wickert J, Lion Y *Radiophys. Quantum Electron.* **51** 1 (2008)]
29. Pavelyev A G et al. *Geophys. Res. Lett.* **36** L21807 (2009)
30. Павельев А Г, Матюгов С С, Яковлев О И *Радиотех. и электрон.* **53** 1081 (2008) [Pavelyev A G, Matyugov S S, Yakovlev O I *J. Commun. Technol. Electron.* **53** 1021 (2008)]
31. Яковлев О И, Матюгов С С, Ануфриев В А *Изв. вузов. Радиофизика* **52** 181 (2009) [Yakovlev A G, Matyugov S S, Anufriev V A *Radiophys. Quantum Electron.* **52** 165 (2009)]
32. Яковлев О И, Викерт Й, Ануфриев В А *Докл. РАН* **427** 624 (2009) [Yakovlev O I, Wickert J, Anufriev V A *Dokl. Phys.* **54** 363 (2009)]
33. Yakovlev O I et al. *Acta Astronaut.* **63** 1350 (2008)

PACS numbers: 41.20.Jb, **94.20.** – y, **94.80.** + g
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201005k.0548

Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы

В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко,
Е.С. Андреева, И.А. Нестеров

1. Введение

Для изучения ионосферы и физики протекающих в ней процессов необходимы исследования пространственного распределения ионосферной плазмы. Ионосфера как среда распространения радиоволн существенным образом влияет на работу различных систем навигации, локации и связи. Поэтому исследования структуры ионосферы представляют интерес для многих практических задач. Существующие радиолокационные средства и ионозонды позволяют проводить лишь локальную диагностику ионосферы. Создание достаточно плотной сети традиционных средств зондирования ионосферы весьма сложно и дорого. Низкоорбитальные (типа российской системы "Цикада" и американской

"Транзит") и высокоорбитальные (GPS/ГЛОНАСС) спутниковые навигационные системы и сеть наземных приёмников дают возможность проводить зондирование ионосферы по различным направлениям и применять томографические методы, т.е. позволяют восстанавливать пространственную структуру электронной концентрации ионосферы. Методы спутниковой радиотомографии (РТ) ионосферы успешно развиваются в настоящее время [1–7]. С начала 1990-х годов действуют системы РТ на базе низкоорбитальных (НО) навигационных систем. В последние годы активно проводятся РТ-исследования по данным высокоорбитальных (ВО) навигационных систем [6, 7]. Для обозначения различных видов РТ здесь используются термины "низкоорбитальная РТ" и "высокоорбитальная РТ" ионосферы (НОРТ и ВОРТ соответственно).

2. Низкоорбитальная радиотомография ионосферы

Низкоорбитальные навигационные системы, имеющие практически круговую орбиту на высоте около 1000–1150 км, и наземные цепочки приёмников дают возможность получать серии РТ-данных по различным лучам. В РТ-экспериментах приём двух когерентных спутниковых сигналов на частотах 150 и 400 МГц и регистрация разности фаз между ними (приведённой фазы) осуществляется на сети из нескольких наземных приёмных станций, расположенных вдоль траектории спутников на расстояниях нескольких сотен километров. Измерения приведённой фазы φ в приёмных точках являются данными для РТ-реконструкции. Интегралы от электронной концентрации N вдоль лучей между приёмником на Земле и передатчиком на спутнике пропорциональны абсолютной (полной) фазе Φ [1, 2], включающей в себя неизвестную начальную фазу φ_0 :

$$\alpha \lambda r_e \int N d\sigma = \Phi = \varphi_0 + \varphi, \quad (1)$$

где λ — длина зондирующей волны, $d\sigma$ — элемент длины луча, r_e — классический радиус электрона, коэффициент пропорциональности α (порядка единицы) определяется выбором зондирующих частот. Перепишем уравнение (1) в операторном виде [4], учитывая типичный некоррелированный экспериментальный шум ξ :

$$PN = \Phi + \xi, \quad (2)$$

здесь P — проекционный оператор, переводящий двумерное распределение N в набор одномерных проекций Φ . Таким образом, задача томографической реконструкции состоит в решении системы линейных интегральных уравнений (2) и нахождении электронной концентрации N . Одним из возможных вариантов является дискретизация (аппроксимация) проекционного оператора P . В этом случае получаем соответствующую систему линейных уравнений (СЛУ) с дискретным оператором L :

$$LN = \Phi + \xi + E, \quad E = LN - PN, \quad (3)$$

где E — ошибка аппроксимации, зависящая от самого решения N . Отметим, что уравнения (2) и (3) эквивалентны, если известна ошибка аппроксимации E .

В.Е. Куницын, Е.С. Андреева, И.А. Нестеров. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, РФ
E-mail: kunitsyn@phys.msu.ru
Е.Д. Терещенко. Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН, Мурманск, РФ

Однако при реконструкции данных реального РТ-эксперимента E неизвестна и фактически решается другая СЛУ:

$$LN = \Phi + \xi. \quad (4)$$

Система (4) не эквивалентна СЛУ (3). Иными словами, разница в решениях (3) и (4) определяется как различием квазишумовой компоненты ξ , так и коррелированной (по времени и лучам) ошибкой аппроксимации E . Для решения СЛУ (4) должна быть известна абсолютная фаза Φ вместе с φ_0 . Погрешности в оценке φ_0 для разных приёмников могут привести к противоречивости и несогласованности данных и в результате к низкому качеству РТ-реконструкций. Поэтому был разработан метод фазоразностной РТ, или РТ по разности линейных интегралов на близких лучах [8], не требующий определения начальной фазы φ_0 . СЛУ для фазоразностной РТ определяется соответствующей разностью:

$$AN = LN - L'N = \Phi - \Phi' = D + \xi, \quad (5)$$

где $LN = \Phi$ — исходная СЛУ, $L'N = \Phi'$ — СЛУ, сформированная по набору близких лучей, D — разность интегралов (1) для близких лучей.

Существует большое число алгоритмов решения систем линейных уравнений (4), (5), как прямых, так и итерационных. В настоящее время в задачах лучевой РТ ионосферы наиболее часто используются итерационные алгоритмы, применяют также неитерационные алгоритмы: метод сингулярного разложения и его модификации, методы регуляризации среднеквадратичного отклонения, ортогональной декомпозиции, максимальной энтропии, квадратичного программирования и его разновидности, байесовский подход и т.д. [3–7]. В процессе моделирования и проведения большого числа экспериментальных НОРТ-реконструкций были найдены эффективные комбинации различных методов и алгоритмов, дающие наиболее качественные реконструкции.

Фазоразностная НОРТ даёт заметно лучшие результаты и обладает более высокой чувствительностью по сравнению с фазовыми методами, что подтверждается результатами моделирования и экспериментальными данными [4, 7, 9]. Разрешение в задаче НОРТ в линейной постановке составляет 20–30 км по горизонтали и 30–40 км по вертикали. Если учитывать рефракцию зондирующих лучей, то пространственное разрешение метода НОРТ ионосферы можно улучшить до 10–20 км [7].

Первые в мире НОРТ-реконструкции были получены в марте–апреле 1990 г. сотрудниками Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова и Полярного геофизического института (ПГИ) Кольского научного центра РАН [10]. В качестве примера на рис. 1 в координатах географическая широта–высота (в километрах) приведено в единицах 10^{12} м^{-3} одно из первых полученных РТ-сечений ионосферы — РТ-сечение ионосферы между Москвой и Мурманском, на котором хорошо виден провал ионизации в области широт 63° – 65° с локальным экстремумом внутри. Дальнейшие многочисленные эксперименты показали сложность и разнообразие структуры и динамики провала [1–7]. Позднее, в 1992 г., были получены предварительные результаты РТ-реконструкций ионосферы зарубежными коллегами [11]. В 1994 г. начались эксперименты на РТ-

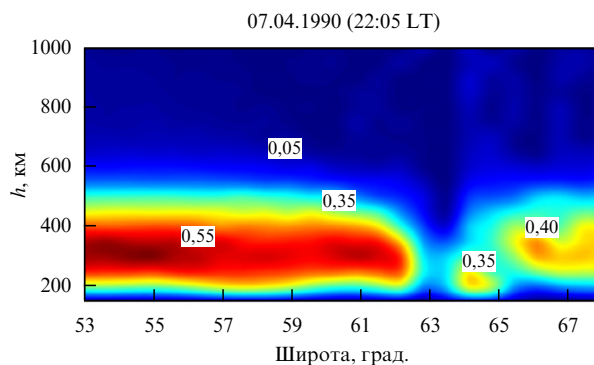


Рис. 1. Пример одной из первых НОРТ-реконструкций электронной плотности ионосферы (Москва–Мурманск) в единицах 10^{12} м^{-3} по данным 7 апреля 1990 г., 22 : 05 LT (местное время).

системе Москва–Архангельск, созданной Институтом земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН) [12].

Исследования по НОРТ ионосферы и её приложениям вызывают заметный интерес в мире — в настоящее время более десяти научных групп в ведущих странах проводят работы в этом направлении [3–7]. В течение последних двадцати лет в различных регионах Европы, Америки и Юго-Восточной Азии были проведены серии успешных НОРТ-экспериментов [3–7], которые показали широкие возможности методов РТ для исследований разнообразных ионосферных структур.

Неоднократно на РТ-сечениях в различных регионах наблюдались такие известные волновые структуры, как перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) [3–7]. В качестве примера на рис. 2 приведена РТ-реконструкция ионосферы, на которой хорошо видны ПИВ с характерным углом наклона около 45° , зарегистрированные на трассе Москва–Архангельск [12].

В ходе РТ-экспериментов в Юго-Восточной Азии по низкоширотной трассе Манила–Шанхай был выявлен ряд структурных особенностей экваториальной аномалии (ЭА): ориентация сформировавшегося "ядра" ЭА (область электронной концентрации вблизи уровня максимума) в полуденные часы вдоль направления магнитного поля Земли, существенная асимметрия краёв ЭА, а также характерные чередования "расширения и сужения" F-слоя ионосферы [13–15]. Наблюдаемые устойчивые

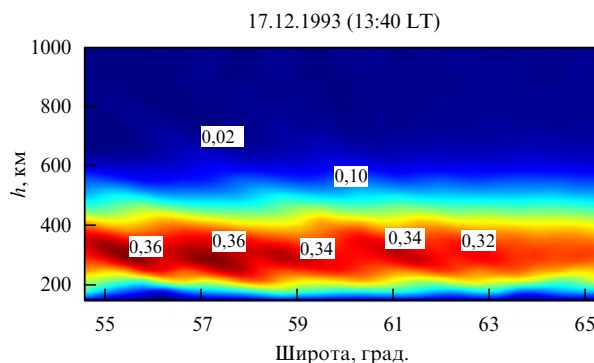


Рис. 2. НОРТ-реконструкция перемещающихся ионосферных возмущений (Москва–Архангельск) в единицах 10^{12} м^{-3} по данным 17 декабря 1993 г., 13 : 40 LT.

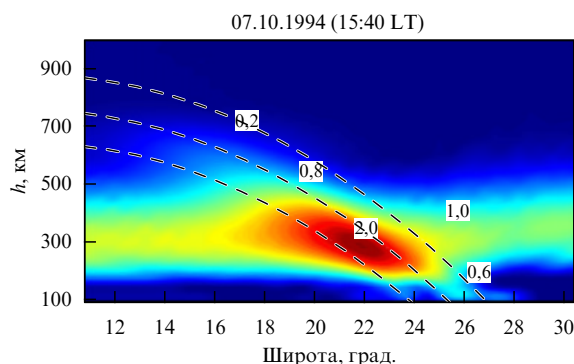


Рис. 3. НОРТ-реконструкция экваториальной аномалии (Манила – Шанхай) в единицах 10^{12} м^{-3} по данным 7 октября 1994 г., 15:40 LT. Силовые линии магнитного поля Земли показаны штриховыми кривыми.

структурные особенности ЭА могут быть интерпретированы на основе анализа потоков и скоростей плазмы в районе ЭА, обусловленных так называемым фонтан-эффектом [7]. Восстановление структуры Е-области ионосферы методами РТ существенно сложнее, поскольку вклад Е-области в регистрируемые данные значительно меньше вклада F-области. Однако если размер РТ-системы позволяет образовать систему пересекающихся лучей в F- и Е-областях ионосферы, то можно реконструировать структуру Е-области [16]. Пример РТ-реконструкции структуры F- и Е-областей ЭА представлен на рис. 3. Силовые линии магнитного поля Земли показаны штриховыми кривыми. Сформировавшееся "ядро" ЭА ориентировано вдоль направления магнитного поля Земли, хорошо видны асимметрия краёв гребня ЭА и вариации толщины F-слоя. Наблюдается также "продавливание" нижнего края F-слоя потоком плазмы вдоль силовой линии, т.е. проникновение потока плазмы из F-области в нижние слои области Е в диапазоне широт $24^\circ - 26^\circ$. В области, находящейся за "ядром" ЭА ($\approx 28^\circ - 31^\circ$), образуется "перетяжка".

В ходе ряда экспериментов были проведены апробация НОРТ ионосферы, сопоставление результатов НОРТ-реконструкций с данными радаров некогерентного рассеяния и ионозондов [3–7]. Одним из первых таких экспериментов является проведённый осенью 1993 г. Российско-американский томографический эксперимент (RATE'93) по сопоставлению результатов НОРТ-сечений ионосферы с данными радара некогерентного рассеяния в Millstone Hill (США). Результаты RATE'93 показали высокое качество НОРТ-реконструкций и совпадение результатов радарных сечений и НОРТ-сечений в рамках точности обоих методов [17]. Аналогично следует констатировать совпадение данных ионозондов и НОРТ в рамках ограничений обоих методов [3–7, 14].

Сейчас существует около десяти действующих сетей (линеек) приёмников НОРТ в различных регионах мира (Россия, США, Великобритания, Скандинавия и Финляндия, Аляска, Гренландия, Карибский регион [2–7, 17–19]), которые активно используются для исследовательских целей. Создана НОРТ-система в Индии, модернизируется НОРТ-система в Юго-Восточной Азии. Российская трансконтинентальная РТ-система (Сочи – архипелаг Шпицберген), состоящая из девяти приёмных станций, является самой протяжённой в мире (около 4000 км) и не имеет аналогов [20]. Уникальность россий-

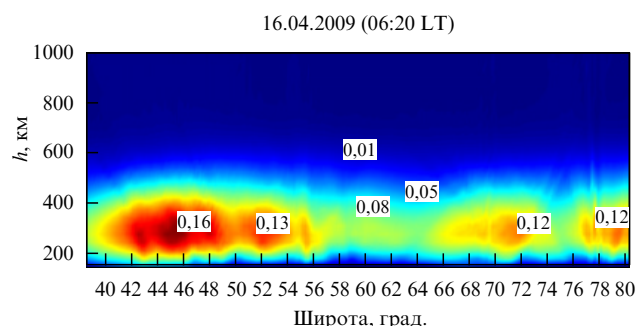


Рис. 4. НОРТ-реконструкция электронной плотности ионосферы (Сочи – архипелаг Шпицберген) в единицах 10^{12} м^{-3} по данным 16 апреля 2009 г., 06:20 LT.

кой НОРТ-системы состоит в том, что данные наблюдений охватывают область ионосферы от авроральных (зоны полярной шапки) широт до низких. Это даёт возможность исследовать передачу возмущений между авроральной, субавроральной и низкоширотной ионосферой, а также изучать структуру ионосферной плазмы в различных широтных областях в зависимости от различных гелиогеофизических условий. В качестве примера на рис. 4 приведено НОРТ-сечение ионосферы между Сочи и Шпицбергом для спокойных геомагнитных условий (индекс геомагнитной возмущённости $K_p < 1$). В районе Шпицбергена ($78^\circ - 79^\circ$) зарегистрированы квазиволновые возмущения масштабом порядка 50 км. В центральной области реконструкции ($59^\circ - 65^\circ$) заметно понижение электронной концентрации. На юге РТ-сечения ($42^\circ - 55^\circ$) хорошо видны квазиволновые структуры масштабом около 100–150 км, т.е. наблюдается сложная структура ионосферной плазмы даже в спокойных условиях.

НОРТ позволяет не только восстанавливать ионосферные неоднородности естественного происхождения, но и обнаруживать ионосферные возмущения, порождаемые антропогенными источниками, в частности возмущения, вызванные стартами ракет [7, 21, 22], промышленными взрывами [23], мощным коротковолновым излучением [24–26].

Таким образом, НОРТ позволяет реконструировать "мгновенные" (10–15 мин) двумерные сечения электронной концентрации ионосферы. Интервал между НОРТ-реконструкциями зависит от числа действующих спутников и в настоящее время составляет 30–120 мин. Метод НОРТ позволяет также определять потоки плазмы, рассматривая последовательные во времени РТ-сечения ионосферы [27]. При наличии нескольких линеек приёмников, расположенных на расстояниях порядка нескольких сотен километров друг от друга, можно восстанавливать трёхмерную структуру ионосферы. Основным существенным ограничением НОРТ является необходимость создания систем со многими линейками приёмников.

3. Высокоорбитальная радиотомография ионосферы

С развёртыванием в США и России глобальных навигационных систем GPS (Global Positioning System) и ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая

система) появилась возможность проводить непрерывные измерения характеристик проходящих через ионосферу радиосигналов и решать обратные задачи радиозондирования [6, 7]. В ближайшие годы планируется развертывание и других систем, в частности европейской ("Galileo") и китайской систем. Здесь для обозначения всех глобальных навигационных систем будем использовать общепринятую аббревиатуру GNSS (Global Navigation Satellite System). В настоящее время информация, постоянно получаемая сетями приёмников GNSS, даёт возможность постановки задач реконструкции распределения электронной плотности в ионосфере. Существует ряд региональных и глобальных сетей приёмников GNSS, в частности, сеть IGS (International Geodetic Service) насчитывает более полутора тысяч приёмников. Основной особенностью обратных задач радиозондирования по данным GNSS, относящихся к типу томографических задач с неполными данными, является их высокая размерность. Сравнительно низкая угловая скорость высокоорбитальных спутников GNSS определяет необходимость учёта временной изменчивости ионосферы, что приводит к постановке задачи четырёхмерной томографии (три пространственные координаты и время). Четырёхмерность задачи делает особенно существенной неполноту исходных данных — лучи спутник–приёмник проходят не через все точки пространства и в зонах с малым числом приёмников образуются области отсутствия данных, что требует разработки специальных подходов [28].

Для целей зондирования ионосферы используются значения измеряемых фаз радиосигналов, распространяющихся от спутника до наземного приёмника для двух когерентных и кратных рабочих частот. Например, для системы GPS — это частоты $f_1 = 1575,42$ МГц, $f_2 = 1227,60$ МГц. Соответствующие данные, которые представляют собой фазовые пути радиосигналов, измеренные в длинах зондирующих волн, принято обозначать как L_1 и L_2 . Кроме того, можно использовать псевдодальности P_1 и P_2 (групповые пути радиосигналов), измеренные по времени распространения пучков волн на частотах f_1 и f_2 . Фазовые данные L_1 и L_2 позволяют вычислить полное электронное содержание (Total Electron Content, TEC) — интеграл вдоль луча, соединяющего передатчик и приёмник:

$$\text{TEC} = \left(\frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + \text{const}, \quad (6)$$

где размерный коэффициент $K = 40,308 \text{ м}^3 \text{ с}^{-2}$, $c = 3 \times 10^8 \text{ м с}^{-1}$ — скорость света в вакууме.

Подчеркнём, что используя данные фазовых измерений L_1 и L_2 , можно вычислить TEC только с точностью до неизвестной константы, которая указана в формуле (6) в виде дополнительного аддитивного слагаемого. Соотношение (6) аналогично (1) с неизвестной константой в правой части системы уравнений.

Псевдодальности P_1 и P_2 также позволяют определить TEC [29]:

$$\text{TEC} = \frac{P_2 - P_1}{1/f_2^2 - 1/f_1^2}. \quad (7)$$

Однако такие данные искажены и зашумлены сильнее, чем фазовые. Уровень шума в P_1 и P_2 составляет обычно не менее 20 % – 30 %. В то же время зашумлённость

фазовых данных составляет, как правило, меньше 1 % и редко достигает нескольких процентов. Таким образом, представляется предпочтительным использование для ВОРТ фазовых данных.

Задачи ВОРТ в подавляющем большинстве работ (см., например, [6]) решаются по набору линейных интегралов, т.е. предполагается, что наборы TEC определяются с достаточной точностью по фазовым и групповым данным (6), (7). Однако точность определения абсолютного TEC (7) низка, с высокой точностью измеряются только разности TEC (6), поэтому здесь также применялся фазоразностный подход [28]. Иными словами, в качестве входных данных для задачи РТ использовались не абсолютные значения TEC, а соответствующие разности или производные по времени $d(\text{TEC})/dt$.

Для решения задачи четырёхмерной РТ по данным GNSS можно использовать подход, разработанный в двумерной НОРТ. Распределение электронной концентрации представляется в виде разложения по некоторым локальным базисным функциям, тогда набор линейных интегралов или разностей линейных интегралов преобразуется в СЛУ. Однако четырёхмерная РТ, в отличие от двумерной, требует дополнительной процедуры интерполяции найденных решений в области отсутствия данных. Реализация этого подхода в регионах с густой сетью станций (Северная Америка, Европа) дала хорошие результаты на достаточно грубой сетке при выборе подходящих сплайнов с различной гладкостью [28, 30].

Другой подход основывается на идее поиска достаточно гладких решений задачи, таких, при которых используемые алгоритмы обеспечивали бы хорошую интерполяцию в областях отсутствия данных. Например, выберем некоторую соболевскую норму и будем искать решение, минимизирующее эту норму на бесконечном множестве решений исходной (недоопределённой) томографической задачи (5):

$$AN = D, \quad \min_{AN=D} \|f - f_0\|_{W_n}^2.$$

При реализации этого подхода встречаются сложности, связанные с решением минимизационной задачи с ограничениями. Прямой путь решения этой задачи, основанный на использовании метода неопределённых множителей Лагранжа, приводит к СЛУ с матрицами, имеющими высокую размерность (вследствие большого числа лучей) и, кроме того, не обладающими специальной структурой, которая могла бы облегчить решение СЛУ. Поэтому был предложен [28] итерационный метод решения минимизационной задачи, являющийся вариантом метода SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) с дополнительным сглаживанием посредством фильтрации итерационных приращений по пространственным переменным. Метод позволяет учитывать априорную информацию, выражаемую как в начальном приближении для итераций, так и в виде весовых коэффициентов, задающих относительные масштабы вариаций электронной концентрации на различных высотах.

Компьютерное моделирование показало приемлемое качество восстановления квазистационарных структур, хотя разрешение ВОРТ значительно ниже разрешения НОРТ. Как правило, в Европе и на большей части территории США вертикальное и горизонтальное разре-

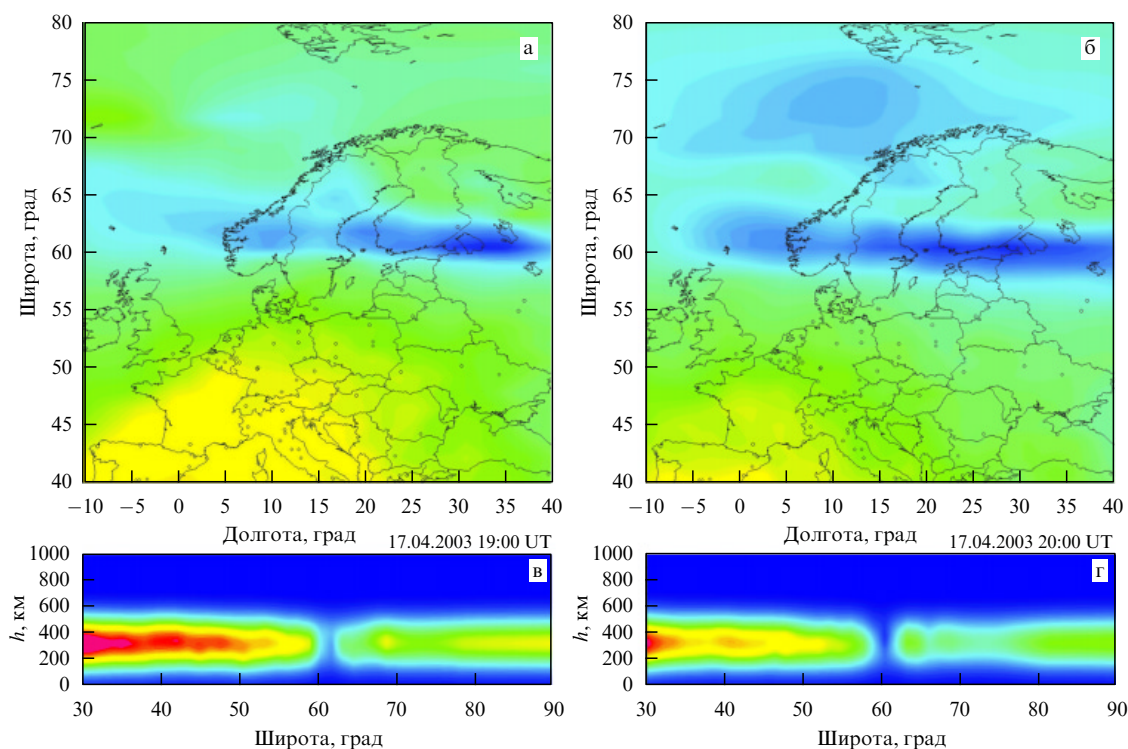


Рис. 5. ВОРТ-реконструкции ионосферы над Европой 17 апреля 2003 г.: (а, в) 19:00 UT, (б, г) 20:00 UT. (а, б) ТЕС в координатах широта – долгота, цветовая шкала от 0 до 35 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$). На рисунках в, г показаны вертикальные сечения электронной плотности ионосферы вдоль 21° восточной долготы в координатах широта – высота h , цветовая шкала от 0 до $0,6 \times 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

шение ВОРТ не лучше 100 км. Только в районе плотных сетей южной Калифорнии и Японии можно достичь разрешения в 30–50 км.

Для иллюстрации результатов применения разработанных методов ВОРТ приведём примеры реконструк-

ций. На рисунке 5 показан пример эволюции ионосферного провала над Европой вечером 17 апреля 2003 г. На картах ТЕС и меридиональных вертикальных сечениях (по 21° долготы) видно расширение провала на фоне общего ночного понижения электронной концентрации.

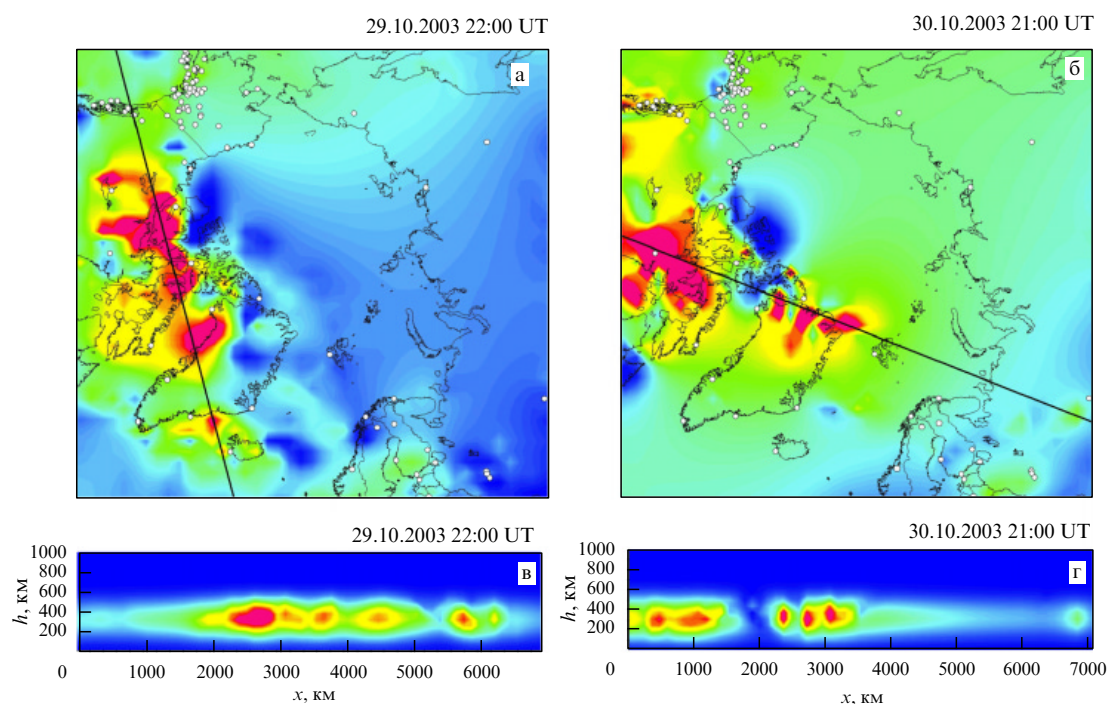


Рис. 6. ВОРТ-реконструкции ионосферы над Арктикой 29 и 30 октября 2003 г. (а, б) Карты ТЕС, цветовая шкала от 0 до 60 TECU. (в, г) Вертикальные сечения электронной плотности вдоль линий, отмеченных на картах ТЕС, x — расстояние по поверхности Земли вдоль выделенных линий, h — высота, цветовая шкала от 0 до $2,5 \times 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рисунке 6 показаны аномальные повышения электронной концентрации (до $3 \times 10^{12} \text{ м}^{-3}$) над Арктикой в период сильнейшей магнитной бури 29–31 октября 2003 г. Увеличение электронной концентрации на ночной стороне связано с конвекцией плазмы с дневной стороны на ночную. Области повышенной ионизации имеют вид языков с неоднородной, пятнистой структурой (рис. 6а, б), которая показана также на вертикальных разрезах (рис. 6в, г). Разрезы сделаны вдоль линий, изображённых на картах ТЕС (рис. 6а, б). По-видимому, такая структура неоднородностей связана с неустойчивостью ионосферной плазмы и появлением квазиволновых структур.

4. Сочетание радиотомографии с другими методами зондирования

Реализующие радиозатменный (РЗ) метод системы (FormoSat-3/COSMIC и другие, регистрирующие сигналы GNSS на низкоорбитальных спутниках) позволяют получать квазикасательные проекции электронной плотности N [31–33]. РТ-метод с наземным приёмом подразумевает зондирование ионосферы в широком диапазоне различных положений приёмо-передающих систем. В этом смысле РЗ-метод, дающий интегралы от N на семействе квазикасательных лучей (трассы спутник–спутник), является частным случаем РТ-метода, поэтому возможно построение процедуры включения РЗ-данных в общую томографическую схему [7, 34]. Комбинированное применение РТ- и РЗ-методов, при котором к РТ-данным наземных приёмников добавляются данные зондирования на трассах спутник–спутник (данные РЗ-метода), позволяет заметно улучшить вертикальное разрешение РТ-реконструкций.

Отметим, что представленные РТ-методы относятся к лучевой томографии [1], в которой дифракционными эффектами можно пренебречь. Ранее авторами были развиты методы дифракционной и статистической РТ [1, 2, 7]. Дифракционная РТ позволяет восстанавливать структуру отдельных локализованных неоднородностей с учётом дифракционных эффектов. Методы статистической РТ дают возможность получать пространственную структуру статистических характеристик случайно неоднородной ионосферы [7, 35].

5. Заключение

В настоящем сообщении кратко отражены основные результаты томографических исследований ионосферы, выполненных с участием авторов. Дано краткое описание методов спутниковой радиотомографии околоземной плазмы, в том числе НОРТ и ВОРТ. В последние два десятилетия были проведены многочисленные РТ-исследования ионосферы приэкваториальных, средних, субавроральных и авроральных широт в различных регионах мира (Европа, США, Юго-Восточная Азия). Приведены примеры экспериментальных РТ-реконструкций распределений электронной концентрации ионосферы.

Система спутниковой РТ — это распределённая система зондирования: перемещающиеся искусственные спутники Земли и сеть приёмников дают возможность непрерывно зондировать среду по различным направлениям и восстанавливать пространственную структуру ионосферы. НОРТ-системы позволяют получать "мгно-

венные" (10–15 мин) двумерные разрезы ионосферы на расстояниях в несколько тысяч километров. ВОРТ-системы на основе сети автономных приёмников вместе с традиционными средствами зондирования ионосферы позволяют реализовать региональный и глобальный мониторинг околоземной плазмы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-05-00676 и 10-05-01126).

Список литературы

1. Куницын В Е, Терещенко Е Д *Томография ионосферы* (М.: Наука, 1991)
2. Kunitsyn V E, Tereshchenko E D *IEEE Antennas Propag. Mag.* **34** (5) 22 (1992)
3. Leitinger R, in *Review Radio Science. 1996–1999* (Eds W R Stone) (Oxford: Science Publications, 1999) p. 581
4. Kunitsyn V, Tereshchenko E *Ionospheric Tomography* (Berlin: Springer-Verlag, 2003)
5. Pryse S E *Surv. Geophys.* **24** 1 (2003)
6. Bust G S, Mitchell C N *Rev. Geophys.* **46** RG1003 (2008)
7. Куницын В Е, Терещенко Е Д, Андреева Е С *Радиотомография ионосферы* (М.: Физматлит, 2007)
8. Andreeva E S, Kunitsyn V E, Tereshchenko E D *Ann. Geophys.* **10** 849 (1992)
9. Kunitsyn V E et al. *Ann. Geophys.* **13** 1263 (1995)
10. Андреева Е С и др. *Письма в ЖЭТФ* **52** 783 (1990) [Andreeva E S et al. *JETP Lett.* **52** 145 (1990)]
11. Pryse S E, Kersley L J. *Atm. Terr. Phys.* **54** 1007 (1992)
12. Ораевский В Н и др. *Геомагнетизм и астрономия* **35** (1) 117 (1995)
13. Andreeva E S et al. *Geophys. Res. Lett.* **27** 2465 (2000)
14. Franke S J et al. *Radio Sci.* **38** 1011 (2003)
15. Yeh K C et al. *Geophys. Res. Lett.* **20** 4517 (2001)
16. Андреева Е С *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. Астрон.* (2) 62 (2004) [Andreeva E S *Moscow Univ. Phys. Bull.* **59** 67 (2004)]
17. Foster J C et al. *Int. J. Imaging Syst. Technol.* **5** 148 (1994)
18. Nygrén T et al. *Radio Sci.* **32** 2359 (1997)
19. Pakula W A et al. *Radio Sci.* **30** 89 (1995)
20. Куницын В Е и др. *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. Астрон.* (6) 102 (2009) [Kunitsyn V E et al. *Moscow Univ. Phys. Bull.* **64** 661 (2009)]
21. Kunitsyn V E et al. *Ann. Geophys.* **13** 1351 (1995)
22. Ahmadvov R R, Kunitsyn V E *Int. J. Geomagn. Aeron.* **5** GI2002 (2004)
23. Андреева Е С и др. *Космич. исслед.* **39** (1) 13 (2001) [Andreeva E S et al. *Cosmic Res.* **39** 10 (2001)]
24. Tereshchenko E D et al. *Ann. Geophys.* **16** 812 (1998)
25. Tereshchenko E D et al. *Phys. Lett. A* **325** 381 (2004)
26. Фролов В Л и др. *УФН* **177** 330 (2007) [Frolov V L et al. *Phys. Usp.* **50** 315 (2007)]
27. Kunitsyn V E et al. *Geophys. Res. Lett.* **30** 1851 (2003)
28. Куницын В Е и др. *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. Астрон.* (1) 74 (2005) [Kunitsyn V E et al. *Moscow Univ. Phys. Bull.* **60** 94 (2005)]
29. Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J *Global Positioning System: Theory and Practice* (Wien: Springer-Verlag, 1992)
30. Куницын В Е и др. *Вестн. МГУ. Сер. 3. Физ. Астрон.* (6) 67 (2004)
31. Hajj G A et al. *Int. J. Imaging Syst. Technol.* **5** 174 (1994)
32. Kursinski E R et al. *Science* **271** 1107 (1996)
33. Яковлев О И, Павельев А Г, Матюгов С С *Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы* (М.: Либроком, 2009)
34. Андреева Е С, Бербенева Н А, Куницын В Е *Геомагнетизм и астрономия* **39** (6) 109 (1999) [Andreeva E S, Berbeneva N A, Kunitsyn V E *Geomagn. Aeron.* **39** 776 (1999)]
35. Tereshchenko E D et al. *Radio Sci.* **39** RS1S35 (2004)