

## Наблюдения ионосферного провала над Европой при разных уровнях геомагнитной возмущенности по данным радиотомографии

Ю. С. Туманова,<sup>\*</sup> Е. С. Андреева,<sup>†</sup> И. А. Нестеров<sup>‡</sup>  
 Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
 физический факультет, кафедра физики атмосферы  
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2  
 (Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Рассмотрены примеры радиотомографических реконструкций главного ионосферного провала над Европой по данным навигационных спутниковых систем (низкоорбитальных и высокоорбитальных) при различных уровнях геомагнитной возмущенности. В периоды геомагнитных бурь наблюдалась сложная структура ионосферного провала со смещением полярной стенки провала в сторону экватора. Положение, глубина и ширина провала ионизации варьируются в широких пределах в зависимости от геомагнитной активности.

PACS: 94.20.Vv      УДК: 528.81

Ключевые слова: ионосфера, радиотомография, электронная концентрация, ионосферный провал.

Ионосфера обладает выраженной слоистой структурой, в которой присутствуют неоднородности электронной концентрации различных масштабов. Одной из характерных структурных особенностей ионосферы является главный ионосферный провал (ГИП). Он представляет собой узкий «желоб» с пониженными значениями электронной концентрации (от нескольких раз до двух порядков величины по сравнению с фоновыми значениями), вытянутый вдоль геомагнитной широты. Впервые ГИП был зарегистрирован в 1960-х годах при внешнем зондировании  $F_2$ -слоя ионосферы со спутников серии Alouette [1]. С тех пор проведены многочисленные исследования ГИП, однако многие вопросы — статистические и динамические характеристики ГИП, вариации формы ГИП и т. д. — остаются открытыми. Исследования ионосферных провалов не теряют своей актуальности, поскольку затрагивают широкий круг проблем физики ионосферы, навигации, локации, распространения радиоволн, прогнозирования состояния ионосферы и т. д.

В настоящее время существующие навигационные спутниковые системы (НСС) и сети наземных приемников позволяют проводить измерения радиосигналов НСС, проходящих через ионосферу, и применять методы радиотомографии (РТ) для восстановления пространственной структуры электронной концентрации в ионосфере. НСС включают системы первого поколения — низкоорбитальные (НО) системы (типа американской «Transit» и российской «Цикада») и системы второго поколения — высокоорбитальные (ВО) системы (действующие GPS и ГЛОНАСС, а также создаваемые европейская Galileo, китайская BeiDou и японская QZSS).

Исследования структуры ионосферы с применением методов НОРТ начались более 25 лет назад [2, 3]. Методы НОРТ позволяют реконструировать практически «мгновенные» (5–10 мин.) 2D (высота–широта) распределения электронной концентрации в ионосфере над цепочкой приемников в вертикальной плоскости. Разрешение НОРТ составляет 20–30 км по горизонтали и 30–40 км по вертикали. Учет рефракции зондирующих лучей может повысить разрешение метода НОРТ до 10 км [4, 5]. Впервые в мире НОРТ–реконструкции ГИП были получены в марте–апреле 1990 г. сотрудниками МГУ и ПГИ РАН [2]. Метод ВОРТ позволяет восстанавливать 4D (три пространственных координаты и время) распределения электронной плотности ионосферы. Основными особенностями задачи ВОРТ ионосферы являются высокая размерность и существенная неполнота данных, т. е. лучи спутник–приемник проходят не через все точки пространства. Здесь необходима дополнительная процедура интерполяции найденных решений в области отсутствия данных или нахождение сглаженного решения [6–8]. В силу неравномерного покрытия наземными приемными станциями различных регионов вертикальное и горизонтальное разрешение ВОРТ, как правило, не лучше 100 км с шагом по времени 20–60 мин. На плотных сетях приемников (Европа, США, Аляска) можно достичь разрешения в 30–50 км с шагом по времени 10–30 мин. В районе очень плотных сетей Калифорнии и Японии возможно достичь разрешения в 30–40 км с шагом по времени до 2 мин. С основными результатами исследований по НОРТ и ВОРТ ионосферы можно ознакомиться в следующих обзорах и работах [4, 5, 9–11]. Таким образом, методы РТ ионосферы позволяют получать регулярные данные о динамике и структуре ионосферы, в том числе и о провалах ионизации. В данной работе представлены примеры РТ реконструкций ионосферы над европейским регионом при различных уровнях геомагнитной возмущенности.

<sup>\*</sup>E-mail: 88julia88@mail.ru

<sup>†</sup>E-mail: es\_andreeva@mail.ru

<sup>‡</sup>E-mail: nia2002@yandex.ru

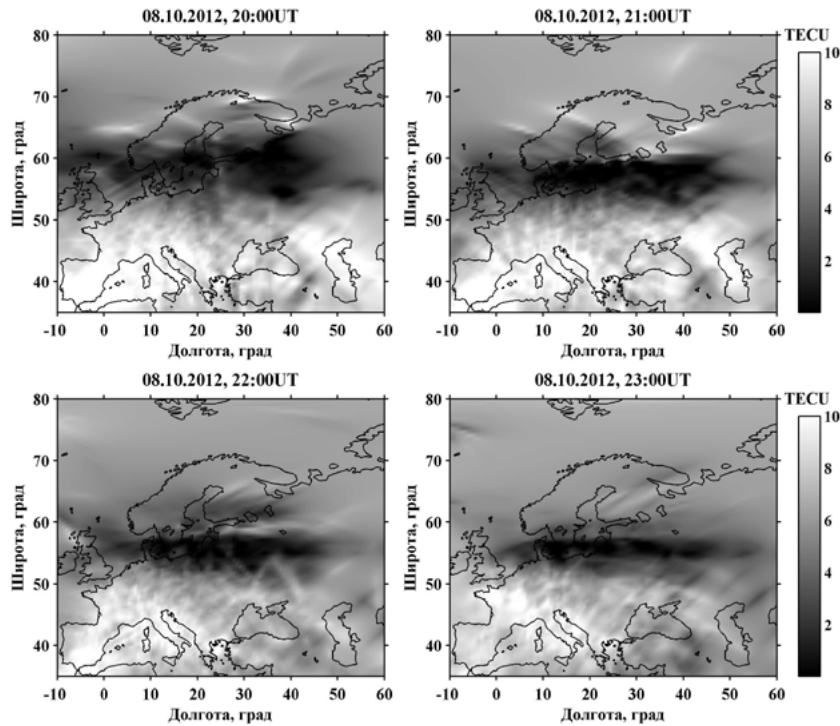


Рис. 1: Пример эволюции провала ионизации над Европой 08.10.2012, 20:00-23:00UT

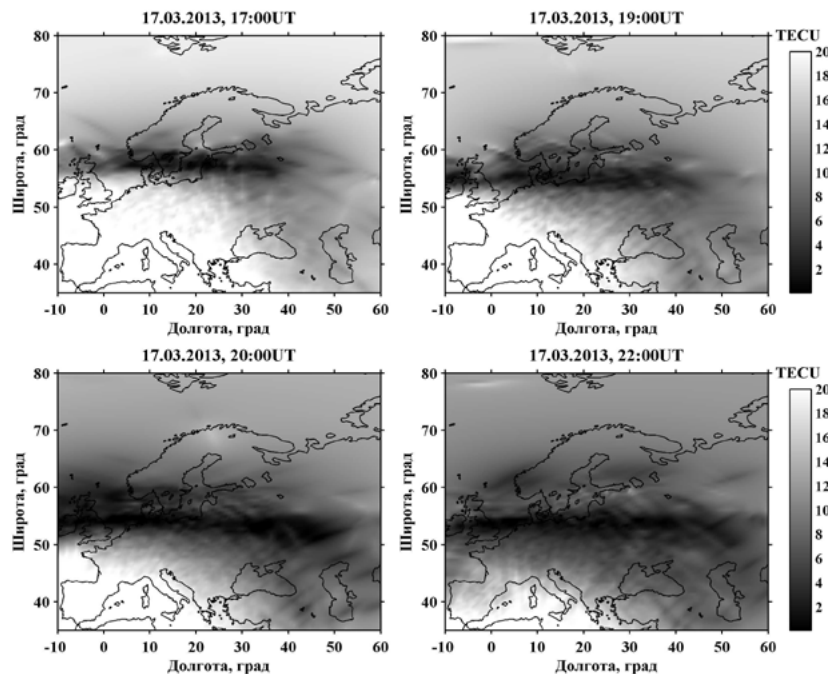


Рис. 2: Пример эволюции провала ионизации над Европой 17.03.2013, 17:00-22:00 UT

В качестве иллюстрации на рис. 1 и 2 приведены примеры эволюции ионосферы с провалом ионизации над Европой по результатам ВОРТ реконструкций.

На рис. 1 на картах вертикального ТЕС (полное электронное содержание — total electron content), вы-

численных из 4D ВОРТ-реконструкций, можно наблюдать появление глубокого и широкого провала ионизации в районе широт  $58^{\circ}$ – $63^{\circ}$  с.ш. в 20:00UT. Карты вертикального ТЕС приведены в единицах TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$ ). Хорошо видно, как в течение

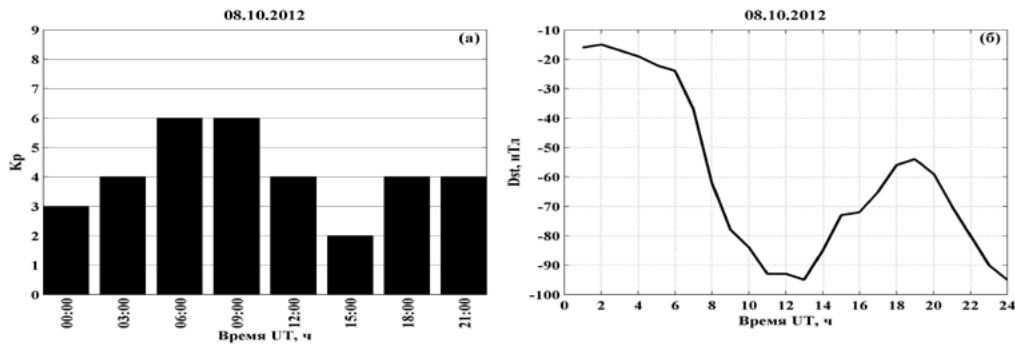


Рис. 3: Изменения геомагнитных индексов Kp (а) и Dst (б) 08.10.2012

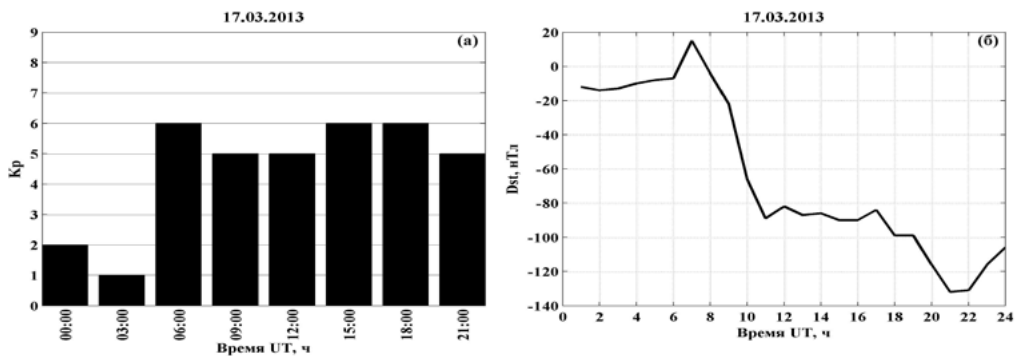


Рис. 4: Изменения геомагнитных индексов Kp (а) и Dst (б) 17.03.2013

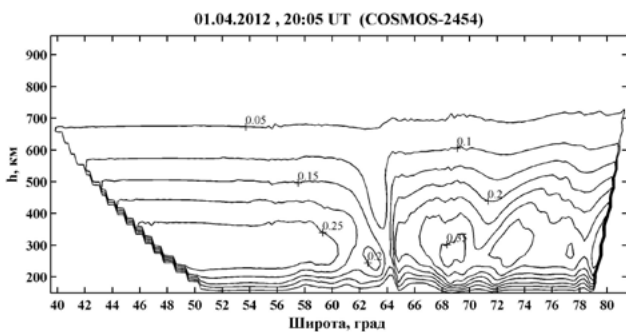


Рис. 5: РТ реконструкция ионосферы (Москва–Шпицберген) 01.04.2012 в 20:05UT

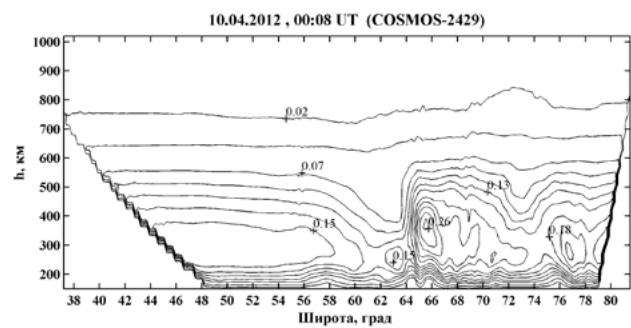


Рис. 6: РТ реконструкция ионосферы (Москва–Шпицберген) 10.04.2012 в 00:08UT

трех часов (с 20:00UT до 23:00UT) провал постепенно трансформируется и смещается в южном направлении. Данные относятся к возмущенному периоду, геомагнитный индекс Kp достигал 4. Изменения значений индексов Kp и Dst для 8 октября 2012г. приведены на рис. 3.

На рис. 2 показан пример эволюции провала ионизации над Европой в период геомагнитной бури 17 марта 2013г., значения индексов геомагнитной активности Kp и Dst представлены на рис. 4. Во время этой бури значение Dst-индекса достигало  $-132$  нТл, максимальный уровень трехчасового Kp-индекса составил 6.

Следует отметить, что в период бури провал ионизации расположен заметно южнее ( $57^\circ$ – $59^\circ$  с.ш.). На картах вертикального TЕС в течение 5 часов (17:00–22:00 UT) отчетливо видно, как провал становится более протяженным и постепенно смещается к югу: с  $57^\circ$ – $59^\circ$  с.ш. в 17:00UT до  $51^\circ$ – $53^\circ$  с.ш. в 22:00UT.

Методы НОРТ позволяют восстанавливать более тонкие детали ионосферных структур. Неоднократно были зарегистрированы пятна повышенной ионизации внутри провала. На рис. 5 и 6 приведены в изолиниях в единицах  $10^{12} \text{ м}^{-3}$  примеры томографических реконструкций провала ионизации над северо-западом России (Москва–Шпицберген).

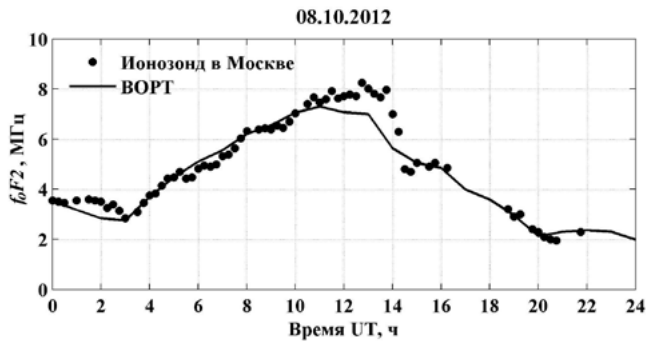


Рис. 7: Сравнение значений критических частот  $f_0F_2$ , вычисленных по ВОРТ реконструкциям и по данным ионозонда в Москве 08.10.2012

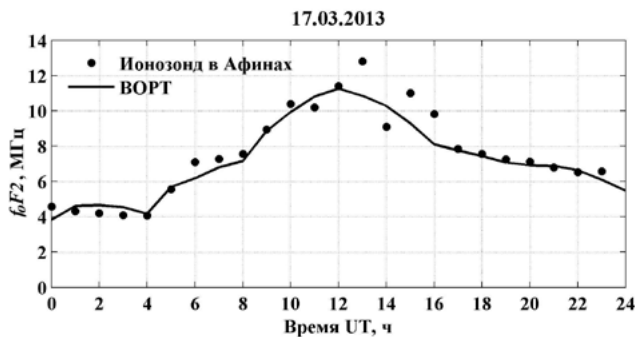


Рис. 8: Сравнение значений критических частот  $f_0F_2$ , вычисленных по ВОРТ реконструкциям и по данным ионозонда в Афинах 17.03.2013

На НОРТ сечении (рис. 5) хорошо видны провал ионизации в области широт  $62^\circ$ – $65^\circ$  с.ш. и пятно повышенной ионизации внутри провала ( $62^\circ$ – $63^\circ$  с.ш.), а также идентифицируются квазиволновые возмущения к северу от провала в области широт  $66^\circ$ – $78^\circ$  с.ш. Узкий провал ионизации в окрестности широты  $64^\circ$  с.ш. зарегистрирован на НОРТ реконструкции, представленной на рис. 6. Кроме того, наблюдаются локаль-

ный пик ионизации в районе широты  $63^\circ$  с.ш. и квазиволновые возмущения в северной части реконструкции ( $68^\circ$ – $77^\circ$  с.ш.)

Проведенный анализ РТ реконструкций ионосферы показывает, что форма, ширина и глубина провала варьируются в зависимости от уровня геомагнитной активности. Как правило, в периоды геомагнитных возмущений ионосферный провал становится более узким и глубоким. С ростом геомагнитной активности провал смещается в южном направлении на  $5$ – $10^\circ$ , в некоторых случаях экваториальная стенка провала может достигать  $35^\circ$  с.ш.

Одним из важных достоинств РТ методов ионосферы, использующих УКВ радиоволны, является тот факт, что эти методы позволяют исследовать структуру и динамику ионосферы даже в периоды сильных геомагнитных возмущений, когда эффективная работа ионозондов, использующих КВ радиоволны, невозможна из-за сильного поглощения. Были проведены сопоставления результатов ВОРТ с данными ионозондов в Европе и России по критическим частотам. Суточный ход критических частот по данным ВОРТ достаточно хорошо совпадает с данными ионозондов. В качестве иллюстрации на рис. 7 и 8 приведены примеры сопоставления критических частот  $f_0F_2$ , вычисленных из ВОРТ реконструкций и по данным ионосферных станций в Москве (рис.7) и Афинах (рис.8). В периоды геомагнитных возмущений работа ионозондов часто нестабильна. Например, данные измерений ионозонда в Москве (рис. 7) с 16:00 UT до 19:00 UT отсутствуют. В спокойные периоды расхождение между критическими частотами по данным ВОРТ реконструкций и ионозондов, как правило, заметно меньше одного мегагерца. В периоды сильных геомагнитных возмущений СКО критических частот составляет порядка  $1$ – $2$  МГц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант №14–17–00637). Часть работ, связанная с развитием РТ алгоритмов и обработкой архивных данных, выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант №16–05–01024).

[1] Muldrew D. B. J. Geophys. Res. **70**, N 11. P. 2635. (1965).  
 [2] Андреева Е.С., Галинов А.В., Куницын В.Е. и др. Письма в ЖЭТФ. **52**, № 3. С. 783. (1990).  
 [3] Kunitsyn V.E., Tereschenko E.D. IEEE Antennas and Propagation Magazine. **34**. P. 22. (1992).  
 [4] Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. (М.: Физматлит, 2007).  
 [5] Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С., Нестеров И.А. УФН. **180**, №5, С. 548. (2010).  
 [6] Куницын В.Е., Андреева Е.С., Кожарин М.А., Нестеров И.А. Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 1. С. 74. (2005).  
 [7] Nesterov I.A., Kunitsyn V.E. J. Adv. Space Res. **47**,

N 10. P. 1789. (2011).  
 [8] Куницын В.Е., Нестеров И.А., Падохин А.М., Туманова Ю.С. Радиотехника и электроника. **56**(11). С. 1285. (2011).  
 [9] Pryse S.E. Surv. Geophys. **24**. P. 1. (2003).  
 [10] Bust G.S., Mitchell C.N. Reviews of Geophysics. **46**. RG1003. (2008).  
 [11] Kunitsyn V.E., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Padokhin A.M. Ionospheric Sounding and Tomography by GNSS (In book: Geodetic Sciences — Observations, Modeling and Applications, S. Jin (ed.), InTech. 2013. P. 223).

## **Ionospheric trough observation over Europe according to radiotomography under different geomagnetic conditions**

**Yu. S. Tumanova<sup>a</sup>, E. S. Andreeva<sup>b</sup>, I. A. Nesterov<sup>c</sup>**

*Department of Atmospheric Physics, Faculty of Physics,  
M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*  
E-mail: <sup>a</sup>88julia88@mail.ru, <sup>b</sup>es\_andreeva@mail.ru, <sup>c</sup>nia2002@yandex.ru

Some examples of radiotomographic reconstructions of main ionospheric trough over Europe using navigational satellite systems (low-orbital and high-orbital) data are considered under different geomagnetic conditions. A complicated structure of the main ionization trough with its polar wall moving equatorwards was observed during the geomagnetic storms. The trough position, depth and width vary within a wide range depending on geomagnetic activity.

PACS: 94.20.Vv

Keywords: ionosphere, radiotomography, electron concentration, ionospheric trough

Received 25.04.2016.

### **Сведения об авторах**

1. Туманова Юлия Сергеевна — инженер кафедры физики атмосферы физического факультета МГУ; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: 88julia88@mail.ru.
2. Андреева Елена Станиславовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник, доцент; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: es\_andreeva@mail.ru.
3. Нестеров Иван Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-15-41, e-mail: nia2002@yandex.ru.