

Томографические методы в задаче дистанционного зондирования ионосферы в УФ–диапазоне

А. М. Падохин,^{*} И. А. Нестеров,[†] Е. С. Андреева,[‡] С. А. Калашникова[§]

*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)

В работе представлены результаты сопоставления данных спутниковой УФ–спектрометрии и радиотомографии ионосферы, а также моделирования прямой и обратной задач низкоорбитальной спутниковой УФ–томографии скорости объемной эмиссии OI 135.6 нм в ионосфере.

PACS: 94.20.Tt

УДК: 528.81

Ключевые слова: ионосфера, томография, УФ излучение, моделирование.

Возможность использовать собственное свечение ночного неба в ультрафиолетовом диапазоне длин волн для исследования распределения электронов и ионов O⁺ в F области ионосферы была описана в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века. Проведенные с того времени эксперименты выявили два возможных механизма, вызывающих собственное свечение ионосферы в ультрафиолетовом диапазоне: излучающая рекомбинация ионов O⁺ и электронов и нейтрализация ионов O⁺ ионами O⁻, причем излучающая рекомбинация является основным механизмом для излучения на рассматриваемой в настоящей работе длине волны 135.6 нм.

Проведенные сопоставления данных спутниковой УФ–спектрометрии ионосферы с данными, полученными независимыми методами, в том числе и радиотомографическими, показали, что не смотря на большой уровень шума (по сравнению с радиофизическими измерениями), данные спутниковой УФ–спектрометрии хорошо воспроизводят ионосферные неоднородности различных масштабов. В качестве примера приведем сопоставление данных УФ–спектрометрии TIMED/GUVI с данными низкоорбитальной радиотомографии ионосферы и глобальных ионосферных карт GIM для спокойных геомагнитных условий (рис. 1) [7]. Видно, что данные УФ спектрометрии (рис. 1а) хорошо согласуются с данными низкоорбитальной радиотомографии ионосферы (LORT, рис. 1б), хотя и являются более зашумленными. В то же время данные глобальных ионосферных карт GIM (рис. 1б, группы ESA, JPL, IGS), широко применяемых в настоящее время для ионосферных исследований, не обладают достаточным пространственным разрешением для исследования ионосферных неоднородностей, хорошо выделяемых по данным УФ–спектрометрии и радиотомографии.

В связи с этим разумно использовать данные УФ–спектрометрии в качестве дополнительной информации о состоянии ионосферы, в особенности в областях, где не доступны другие виды наблюдений (из-за невозможности развертывания наземной наблюдательной сети, в первую очередь над океанами).

Кроме того, улучшение в последнее десятилетие характеристик спутниковых УФ–спектрометров, прежде всего с точки зрения уровня шума в данных, открыло возможность использования томографических методов для восстановления распределений электронной концентрации в F слое ионосферы по данным спутниковой УФ–спектрометрии [1–5].

Общей чертой данных работ является использование УФ–спектрометров последнего поколения типа GUVI на спутнике TIMED, SSUSI и SSULI на спутниках DMSP 5D3 для восстановления непосредственно распределения электронной концентрации, что требует привлечения дополнительной информации о фотохимии ионосферы. Поэтому в последние годы все чаще решается задача томографического восстановления скорости объемной эмиссии на выбранной длине волны в ионосфере, не требующая дополнительной информации о физических механизмах, вызывающих данное свечение [8]. Этой проблематике посвящена и настоящая работа, в которой проведено моделирование и оптимизация алгоритмов задачи низкоорбитальной спутниковой УФ–томографии скорости объемной эмиссии OI 135.6 нм в ионосфере для реальной геометрии орбит спутников DMSP 5D3, и режимов работы установленных на них УФ–спектрометров SSUSI и SSULI.

Рассмотрим постановку задачи для 2D–томографии по УФ–данным. Реконструкции подлжет высотный разрез скорости объемной эмиссии OI 135.6 нм в ионосфере вдоль траектории спутника. Исходя из параметров орбиты DMSP 5D3 и режимов работы спектрометров SSUSI и SSULI, геометрия лучей, вдоль которых осуществляется сканирование области реконструкции, представлена на рис. 1а. В качестве модельного будем использовать распределение скорости объемной эмиссии, представленное на рис. 1б.

Интенсивность собственного свечения ионосферы I_k на длине волны 135.6 нм вдоль направления сканиро-

^{*}E-mail: padokhin@physics.msu.ru

[†]E-mail: nia2002@yandex.ru

[‡]E-mail: es_andreeva@mail.ru

[§]E-mail: kalashnikovasv.a@gmail.com

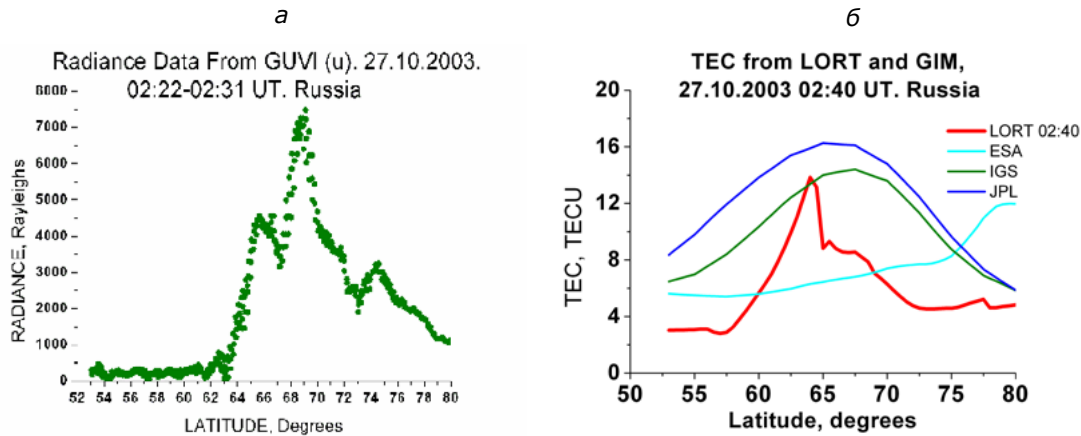


Рис. 1: Сопоставление данных УФ спектрометрии (а), низкоорбитальной радиотомографии и глобальных ионосферных карт (б) в спокойных ($K_p=3.3$) геомагнитных условиях

вания l_k определяется как:

$$\int_{l_k} \varepsilon(\varphi(r), h(r)) \exp\left(-\int \rho(r') dl'\right) dl = 4\pi I_k, \quad (1)$$

где $\varepsilon(\varphi(r), h(r))$ — скорость объемной эмиссии ОI 135.6нм, $\rho(r')$ — коэффициент поглощения. Отметим, что скорость объемной эмиссии ОI 135.6 нм связана с распределением электронной концентрации $[e]$, концентраций ионов $[O^+]$ и атомов $[O]$ кислорода:

$$\varepsilon = \frac{k_1 k_2 \beta_{1356} [O][e][O^+]}{k_2 [O^+] + k_3 [O]} + \alpha_{1356} [e][O^+], \quad (2)$$

где коэффициенты реакций k_1 , k_2 и k_3 приблизительно равны 1.3×10^{-15} см³/с, 1.0×10^{-7} см³/с и 1.4×10^{-10} см³/с, соответственно; вклад реакции нейтрализации в возмущенное состояние (O^5S), соответствующее излучению на длине волны 135.6 нм $\beta_{1356} = 0.54$; коэффициент реакции излучающей рекомбинации α_{1356} зависит от температуры и при 1160°К приблизительно равен 7.5×10^{-13} см³/с. Принимая во внимание характерные значения концентраций электронов, ионов и атомов кислорода на ионосферных высотах, скорость объемной эмиссии ОI 135.6 нм пропорциональна квадрату электронной концентрации. Таким образом, можно рассматривать томографическую задачу (1) относительно неизвестного распределения электронной концентрации, как делается в ряде работ. Однако сам коэффициент пропорциональности между скоростью объемной эмиссии и квадратом электронной концентрации может зависеть как от высоты, так и меняться со временем в зависимости от локального времени и сезона. В связи с этим разумным представляется томографическая реконструкция распределения скорости объемной эмиссии $\varepsilon(\varphi(r), h(r))$ не требующая дополнительной информации о физических механизмах, вызывающих данное свечение, с последующим восстановлением распределения электронной концентрации по полученному распределению $\varepsilon(\varphi(r), h(r))$.

Используя разложение реконструируемой функции по некоторому конечному базису функций, можно перейти от интегрального уравнения (1) к системе линейных алгебраических уравнений относительно коэффициентов разложения реконструируемой функции по данному базису. Для решения полученной СЛУ в данной работе использовались итерационные алгоритмы ART и SIRT, хорошо зарекомендовавшие себя в задачах радиотомографии ионосферы [6].

Приведем результаты восстановления модельного распределения скорости объемной эмиссии, показанной на рис. 1б, по набору данных сканирования вдоль направлений, показанных на рис. 1а. На данном этапе пренебрежем поглощением. Моделирование показало, что алгоритмы ART и SIRT требуют модификации для использования в задаче УФ-томографии ионосферы: необходимо учитывать условие неотрицательности решения, использовать весовые функции для уменьшения решения в областях, где оно априори мало, а также использовать межитерационное сглаживание для устранения влияния погрешности аппроксимации, причем параметр сглаживания должен уменьшаться в ходе итераций. В таком случае можно достичь хорошего качества получаемых реконструкций, ошибки не будут превышать 6% (рис. 2). Видно, что хорошо восстанавливается общий уровень решения, положение структур (слои, положение горбов ЭА, положение провала в северном полушарии). Отметим, что провал в южном полушарии не восстанавливается из-за отсутствия в данной широтной области вертикальных лучей сканирования (модельные данные спектрометра SSUSI), см. рис. 1а, что говорит о важности этих лучей для разрешающей способности метода.

Отметим также, что подход межитерационного сглаживания также позволяет подавить влияние случайных шумов в исходных данных на результаты реконструкции.

Проведенное в работе численное моделирование задачи УФ-томографии ионосферы для реальной гео-

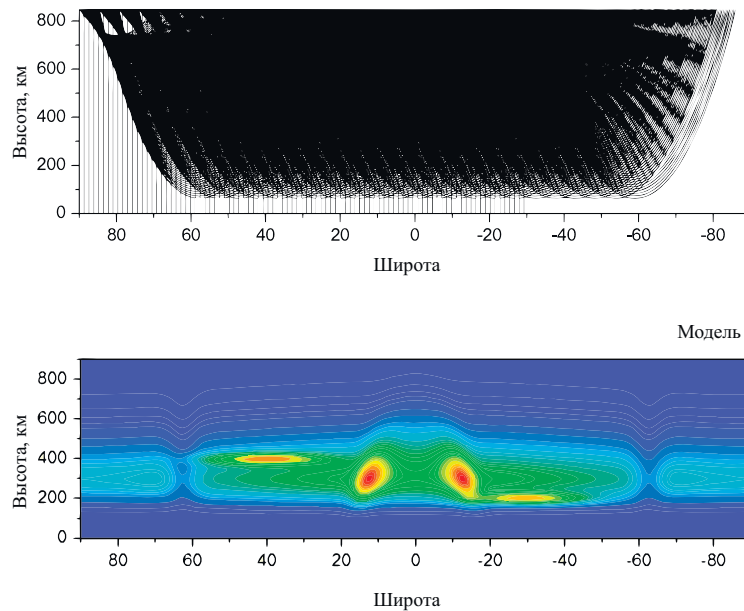


Рис. 2: Геометрия лучей в координатах широта–высота (а) и комплексная модель для реконструкции (б), содержащая ионосферные структуры различных типов

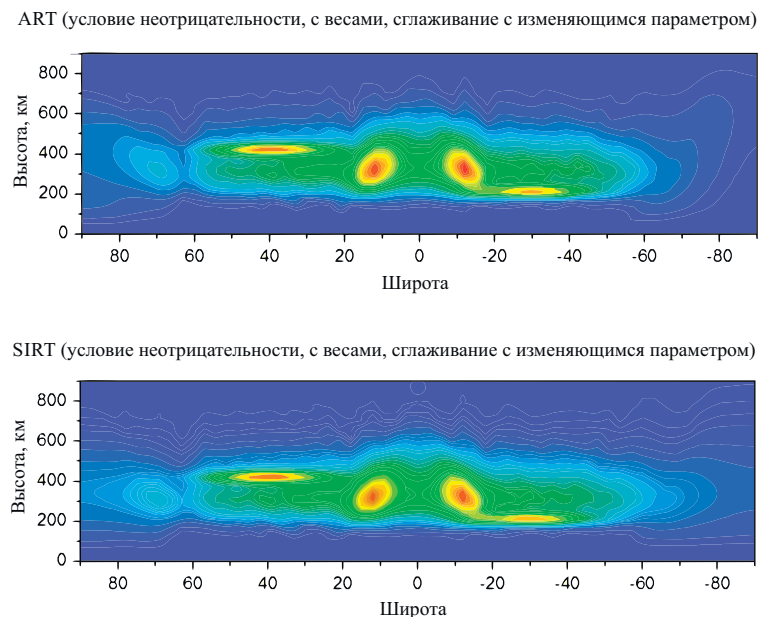


Рис. 3: Результаты реконструкции модельного распределения (рис. 1) методом ART и SIRT

метрии орбит спутников DMSP 5D3 и режимов работы установленных на этих аппаратах спектрометров SSUSI и SSULI показало, что используя хорошо известные и зарекомендовавшие себя в задачах радиотомографии ионосферы итерационные алгоритмы типа ART и SIRT, возможно успешно восстанавливать параметры распределения скорости объемной эмис-

сии OI 135.6 нм в ионосфере. При этом постановка томографической задачи относительно скорости объемной эмиссии позволяет избежать дополнительных трудностей, связанных с учетом фотохимических реакций, вызывающих собственное свечение ионосферы, что необходимо в случае постановки задачи относительно электронной концентрации.

Вместе с тем результаты моделирования показали, что алгоритмы ART и SIRT требуют модификации для использования в задаче УФ-томографии ионосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-35-21065-мол_а_вед).

-
- [1] *Dymond K.F., Thomas R.J.* Radio Sci. **36**. P.1241. (2001).
 [2] *DeMajistre R., Paxton L.J., Morrison D.* et al. *J. Geophys. Res.* **109**, A05305. (2004).
 [3] *Comberiate J.M., Kamalabadi F., Paxton L.J.* Radio Sci. **42**, N2. RS2011. (2007).
 [4] *McMahon E.M., Comberiate J.M., Kelly M.A., Paxton L.J.* 3D Ionospheric Electron Density Reconstructions and Radio Propagation Modeling Using DMSP/SSUSI, 1st AIAA Atmospheric and Space Environments Conference, 22–25 June 2009. (San Antonio, Texas, 2009).
 [5] *Rajesh P.K., Liu J.Y., Hsu M.L., Lin C.H., Oyama K.I., Paxton L.J.* *J. Geophys. Res.* **116**. A02313. (2011).
 [6] *Nesterov I.A., Kunitsyn V.E.* Adv. Space Res. **47**, N 10, P. 1789. (2011).
 [7] *Андреева Е.С., Калашникова С.А., Куницын В.Е., Нестеров И.А.* Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. **10**(1). P. 103. (2013).
 [8] *Нестеров И.А., Падохин А.М., Андреева Е.С., Калашникова С.А.* Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. № 3. С. 92. (2016).

Tomographic methods in the problem of the ionospheric remote sensing in UV-band

A. M. Padokhin^a, I. A. Nesterov^b, E. S. Andreeva^c, S. A. Kalashnikova^d

Department of Physics of Atmosphere, Faculty of Physics,

M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: ^apadokhin@physics.msu.ru, ^bnia2002@yandex.ru, ^ces_andreeva@mail.ru, ^dkalashnikovasv.a@gmail.com

We present the results of the comparison of ionospheric satellite UV-spectrometry and radiotomography data as well as the modelling of the direct and inverse problems of low-orbital satellite UV-tomography of volume emission rate of ionospheric OI 135.6 nm emission.

PACS: 94.20.Tt

Keywords: ionosphere, tomography, UV-radiation, modeling.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Падохин Артем Михайлович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: padokhin@physics.msu.ru.
2. Нестеров Иван Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-15-41, e-mail: nia2002@yandex.ru.
3. Андреева Елена Станиславовна — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: es_andreeva@mail.ru.ru.
4. Калашникова Светлана Андреевна — аспирант кафедры физики атмосферы; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: kalashnikovasv.a@gmail.com.