

ФИЗИКА ЗЕМЛИ, АТМОСФЕРЫ И ГИДРОСФЕРЫ

Трансконтинентальная радиотомографическая система. Результаты первых ионосферных измерений

В. Е. Куницын^{1,a}, Е. Д. Терещенко^{2,b}, Е. С. Андреева¹, В. Ф. Григорьев², Н. Ю. Романова²,
М. О. Назаренко¹, Ю. М. Вапиров³, И. И. Иванов⁴

¹ *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики атмосферы. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.*

² *Учреждение Российской академии наук Полярный геофизический институт КНЦ РАН. Россия, 183010, г. Мурманск, ул. Халтурина, д. 15.*

³ *Государственный южный научно-исследовательский полигон РАН. Россия, 354000, г. Сочи, ул. Театральная, д. 8.*

⁴ *Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета. Россия, 344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, д. 194.*

E-mail: ^a kunitsyn@phys.msu.ru, ^b eogteres@pgi.ru

Статья поступила 02.07.2009, подписана в печать 24.08.2009

Представлены результаты исследований структуры ионосферной плазмы по данным самой протяженной в мире (около 4000 км) трансконтинентальной российской радиотомографической системы от архипелага Шпицберген до Сочи. Уникальность обновленной радиотомографической системы состоит в том, что впервые данные наблюдений охватывают область ионосферы от авроральных (зоны полярной шапки) до низких широт. Это дает возможность исследовать передачу возмущений между авроральной, субавроральной и низкоширотной ионосферой, эволюцию и динамику акусто-гравитационных волн (АГВ) в верхней атмосфере, а также исследовать структуру ионосферной плазмы в различных широтных областях в зависимости от различных внешних факторов и гелиогеофизических условий. Полученные результаты свидетельствуют о сложной структуре ионосферной плазмы даже для спокойных геофизических условий ($K_p < 2$).

Ключевые слова: ионосфера, радиотомография, электронная плотность, волновые структуры, неоднородности ионосферной плазмы.

УДК: 550.388.2. PACS: 94.20.dj, 94.20.Qq, 94.20.Tt.

Введение

Методы радиотомографии (РТ) ионосферы, позволяющие восстанавливать пространственную структуру распределения электронной концентрации при радиозондировании ионосферы, начали интенсивно развиваться более 15 лет назад [1–6]. РТ-системы основаны на наземных цепочках приемников, регистрирующих радиосигналы (на когерентных частотах 150 и 400 МГц) низкоорбитальных навигационных спутников, имеющих практически круговую орбиту порядка 1000–1100 км. Такие системы позволяют получать в плоскости пролета спутника двумерные (высота–широта) РТ-сечения ионосферы на расстояниях в 1–3 тыс. км за времена порядка 5–15 мин. Разрешение РТ ионосферы обычно составляет 20–30 км по горизонтали и 30–40 км по вертикали. Первые в мире экспериментальные РТ-реконструкции ионосферной плазмы были получены в марте–апреле 1990 г. сотрудниками ПГИ РАН и МГУ [1]. Через два года, в 1992 г., были получены предварительные результаты РТ-сечений электронной плотности зарубежными коллегам [5].

С тех пор проведено большое количество экспериментов: на РТ-системе Мурманск–Москва (1990–1999 гг.), которая в дальнейшем была продолжена до архипелага Шпицберген [7] и в настоящее время до

Сочи; на трассе Москва–Архангельск (1993–1996 гг.); в США (с 1993 г.); в Финляндии и Скандинавии (с 1993 г.); в Японии (1995 г.), в Австралии (1995 г.); на Аляске (с 2001 г.); на британской РТ-системе (с 1993 г.); в Гренландии (с 1997 г.); в Юго-Восточной Азии на низкоширотной РТ-системе Манила–Шанхай (1994–1996 гг.), которая в 2006 г. возобновила работу; в Индии (с 2006 г.) и т. д.. Проведенные многочисленные эксперименты показали широкие возможности методов РТ для исследований разнообразных ионосферных структур. В частности, полученные РТ-сечения провалов ионизации выявили сложность и разнообразие форм провалов, причем их ширина, наклон и глубина варьируются в широких пределах. РТ-реконструкции перемещающихся ионосферных возмущений дают информацию о параметрах возмущений и позволяют исследовать атмосферно-ионосферные взаимодействия [4–6]. Проведены РТ-исследования возмущений ионосферы, вызванных антропогенными факторами, в частности возмущений, вызванных стартами ракет, промышленными взрывами, мощным КВ-излучением [3–4]. В ходе РТ-экспериментов в области приэкваториальных широт был выявлен ряд структурных особенностей экваториальной аномалии (ЭА): ориентация сформировавшегося «ядра» ЭА в полуденные часы вдоль направления магнитного поля Земли,

существенная асимметрия краев ЭА, характерные вариации «расширение-сужение» толщины ионосферы и т. д. [3–4]. В ходе ряда экспериментов были проведены сопоставления РТ-результатов с данными ионозондов и радаров некогерентного рассеяния [3–8]. Однако проведенные исследования ограничивались широтным диапазоном до 20°. В настоящей работе впервые представлены результаты трансконтинентальных исследований ионосферы от зоны полярной шапки до низких широт.

Экспериментальные результаты

В 2008 г. к российской РТ-цепочке приемников Шпицберген–Москва были добавлены приемные пункты в Острогжске (50.87° N, 39.06° E), Ростове (47.21° N, 39.7° E) и Сочи (43.58° N, 39.77° E). В настоящее время российская РТ-система, состоящая из 9 приемных станций, имеет наибольшие размеры в мире (около 4000 км) и не имеет аналогов. На рис. 1 представлена геометрия РТ-эксперимента, где пунктирной линией показана проекция траектории типичного пролета спутника (13.10.2008 в 18:46 UT) а звездочками отмечены приемные пункты, которые расположены в обширной области от авроральных до низких широт. На рис. 2,а представлен пример РТ-реконструкции распределения электронной плотности в ионосфере между Сочи и Шпицбергенем в изолиниях в единицах 10^{12} м^{-3} в системе координат: высота h в километрах над поверхностью Земли и географическая широта. На сечении хорошо видны квазиволновые структуры с различными масштабами от нескольких десятков до сотен километров. В центральной части РТ-сечения наблюдается пониженная концентрация (почти в 2 раза) в области средних широт (56–69° N) по сравнению

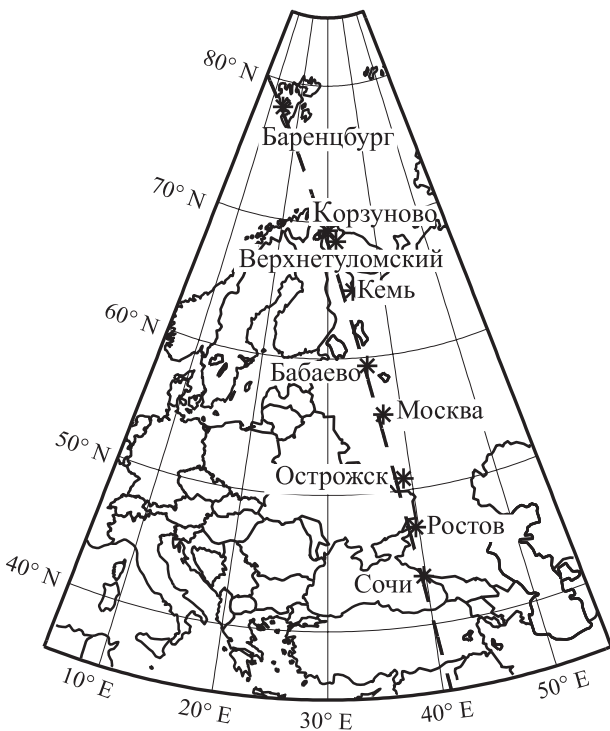


Рис. 1. Геометрия РТ-эксперимента: проекция траектории пролета спутника (пунктирная линия) и местоположение приемных станций (звездочки)

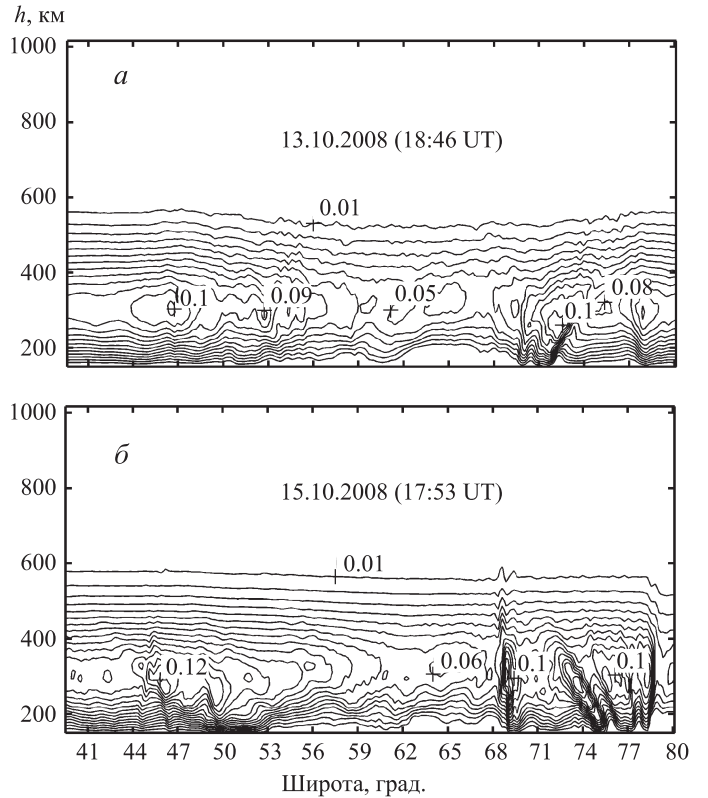


Рис. 2. РТ-сечение электронной плотности (Сочи–Баренцбург) 13 октября 2008 г., 18:46 UT (21:46 LT) (а) и 15 октября 2008 г., 17:53 UT (20:53 LT) (б)

с максимальными значениями электронной плотности на севере и юге. На рис. 2,б показан еще один пример РТ-сечения ионосферы 15 октября 2008 г. в 17:53 UT. На реконструкции выявляются заметные квазиволновые возмущения в области высоких широт 71–76° N, а также «стеночная» структура ионизации в окрестности 68° N. Как и на предыдущей реконструкции, в центральной части РТ-сечения (средние широты) отмечается практически двукратное понижение электронной плотности. В области низких широт хорошо видны квазиволновые структуры с масштабами около 50–100 км. Представленные примеры РТ-сечений ионосферы относятся к невозмущенным геомагнитным условиям (индекс K_p не превышал 2).

Заключение

Результаты исследований на самой протяженной в мире (около 4000 км) трансконтинентальной радиотомографической системе от архипелага Шпицберген до Сочи свидетельствуют о сложной структуре ионосферной плазмы даже для спокойных геофизических условий. Впервые данные наблюдений охватывают область ионосферы от авроральных (зоны полярной шапки) до низких широт, что позволяет исследовать передачу возмущений между полярными и низкоширотными областями ионосферы, эволюцию и динамику АГВ в верхней атмосфере, а также исследовать структуру

ионосферной плазмы в различных широтных областях в зависимости от различных гелиогеофизических возмущений. Если измерения проводить на нескольких приемных цепочках, расположенных на расстояниях порядка нескольких сотен километров друг от друга, можно исследовать трехмерную структуру ионосферы. Подобные РТ-системы на базе низкоорбитальных спутников могут стать основой сети глобального мониторинга ионосферы.

Авторы выражают благодарность сотрудникам ПГИ РАН О.Т. Саакяну и В.М. Сухорукову за активное участие в проведении экспериментальных работ. Работа проведена при поддержке РФФИ (гранты 07-05-01120, 08-05-00676) и в рамках ФЦП «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией Российской Федерации на 2008–2015 годы».

Список литературы

1. Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1990. **52**. С. 783.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М., 1991.
3. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. Ionospheric Tomography. Berlin; Heidelberg; N. Y.: Springer-Verlag, 2003.
4. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М., 2007.
5. Pryse S.E. // Surveys in Geophysics. 2003. **24**. P. 1.
6. Leitingner R. // Rev. Radio Sci. 1999. P. 581.
7. Терещенко Е.Д., Худукон Б.З., Романова Н.Ю. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2003. **78**(11). С. 1221.
8. Foster J., Klobuchar J., Kunitsyn V. et al. // Int. J. of Imaging Systems and Technology. 1994. **5**, N 2. P. 148.

Transcontinental radiotomographic system. First experimental results

V. E. Kunitsyn^{1,a}, E. D. Tereshchenko^{2,b}, E. S. Andreeva¹, V. F. Grigoriev², N. Yu. Romanova², M. O. Nazarenko¹, Yu. M. Vapirov³, I. I. Ivanov⁴

¹ Department of Physics of Atmosphere, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991, Russia.

² Polar Geophysical Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, 183010, Russia.

³ State Southern Research Ground of the Russian Academy of Sciences, Sochi, 354000, Russia.

⁴ Research Institute of Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090, Russia.

E-mail: ^a kunitsyn@phys.msu.ru, ^b evgteres@pgi.ru

Results of studying the structure of ionospheric plasma distribution at the world longest (4000 km) transcontinental Russian radio tomographic system extending from Svalbard Archipelago to Sochi are shown. The uniqueness of the upgraded radio tomographic system is that for the first time measurements cover a wide ionospheric region from polar cap and auroral latitudes to low latitudes. This allows analyzing perturbations transfer between auroral, subauroral, mid-latitude and low-latitude ionosphere. With the Russian RT system it is also possible to study the evolution and dynamics of acoustic-gravity waves (AGW) in the upper atmosphere and to investigate the structure of ionospheric plasma distribution in different latitudes as a function of different external factors and solar-geophysical conditions. The obtained results speak for complex structure of ionospheric plasma distribution even in quiet geophysical conditions ($K_p < 2$).

Keywords: ionosphere, radiotomography, electron density, wavelike structures, ionospheric plasma irregularities.

PACS: 94.20.dj, 94.20.Qq, 94.20.Tt.

Received 2 July 2009.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 6(2009).

Сведения об авторах

1. Куницын Вячеслав Евгеньевич — докт. физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; тел.: (495) 939-38-06, e-mail: kunitsyn@phys.msu.ru.
2. Терещенко Евгений Дмитриевич — докт. физ.-мат. наук, директор Полярного геофизического института КНЦ РАН; тел.: (8152) 25-39-58, e-mail: evgteres@pgi.ru.
3. Андреева Елена Станиславовна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., доцент; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: es_andreeva@mail.ru.
4. Григорьев Валерий Федосеевич — зам. директора Полярного геофизического института КНЦ РАН; e-mail: valgri@pgi.ru.
5. Романова Наталия Юрьевна — науч. сотр.; e-mail: romanova@pgi.ru.
6. Назаренко Марина Олеговна — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр.; тел.: (495) 939-20-89, e-mail: m.o.nazarenko@mail.ru.
7. Вапиров Юрий Михайлович — канд. физ.-мат. наук, зам. директора ГНИП РАН; тел.: (8622) 625-841, e-mail: gnipran@rambler.ru.
8. Иванов Игорь Иванович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., вед. научн. сотр.; e-mail: iivv@yandex.ru.