

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ  
ПРИ РАБОТЕ НАГРЕВНЫХ СТЕНДОВ ПО ДАННЫМ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ  
КОМПЛЕКСОВ РАДИОТОМОГРАФИИ**

**Д.А. Молодцов**

**ANALYSIS OF CHANGES IN THE ELECTRON DENSITY  
IN THE IONOSPHERE WHEN USING HEATING FACILITIES FROM DATA  
OF RADIO TOMOGRAPHY SOFTWARE AND HARDWARE SYSTEMS**

**D.A. Molodtsov**

Методом восстановления высотных профилей электронной концентрации и пространственной интерполяции проанализированы данные эксперимента, проведенного на нагревном стенде «Сура» 10–14 июня 2013 г. Рассмотрены также пространственные изменения электронной концентрации на высотах 100 и 205 км.

Using the method of reconstruction of altitude profiles of electron density and spatial interpolation we analyzed data of experiment carried out on heating facility “Sura” from 10 to 14 June 2013. Spatial variations of the electron density at altitudes of 100 and 205 km are considered.

Для выявления связи изменения электронной концентрации с работой нагревных стендов существуют различные методы, например, высокоорбитальная и низкоорбитальная радиотомография, анализ временного хода полного электронного содержания (ПЭС). Достоинства методов томографии заключаются в том, что получаются двумерные и трехмерные реконструкции изменения электронной концентрации в реальном времени. С другой стороны у этих методов есть свои недостатки при работе с нагревными стендами, например, должно быть определенное минимальное количество приемников спутниковых сигналов и попадание проекции пролета спутника в область нагрева. Преимуществами анализа ПЭС являются глобальные карты абсолютного вертикального значения ПЭС, а недостатком является необходимость достаточно сложного определения абсолютного значения ПЭС, которое проводится путем комбинирования кодовых и фазовых измерений, проводимых GPS-приемником, и требует, как правило, данных с сети приемников. Другим недостатком метода является преобразование наклонного ПЭС в вертикальное при углах места меньше 30 градусов [Смирнов, 2007].

В данной работе предлагается использование метода восстановления высотных профилей электронной концентрации и пространственной интерполяции. На рис. 1 показана схема использования данных программно-аппаратного комплекса радиотомографии различными методами.

Задачей данной работы было выявление связей изменений электронной концентрации с работой нагревного стенда по данным программно-аппаратных комплексов радиотомографии с использованием алгоритма восстановления высотных профилей электронной концентрации и метода пространственной интерполяции, что дает возможность получения значений электронной концентрации на различных высотах другим (не томографическим) методом.

Программно-аппаратный комплекс радиотомографии однопозиционного и многопозиционного восстановления высотных профилей и пространственного распределения электронной concentra-

ции ионосферы является наземным радиотехническим комплексом, который позволяет измерять параметры двух когерентных радиосигналов навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС в реальном времени и получать необходимые для определения параметров ионосферы Земли данные. Результаты измерений амплитуд и приращений фаз двух когерентных радиосигналов каждого наблюдаемого навигационного спутника записываются на жесткий диск персонального компьютера для последующей обработки с целью извлечения информации о пространственном распределении электронной концентрации в ионосфере.

Основным элементом программно-аппаратного комплекса восстановления профилей электронной концентрации ионосферы является программный модуль, основанный на реализации метода радиопросвечивания ионосферы Земли по трассе наземный пункт – навигационный спутник [Васильев, 2013]. Блок-схема программного модуля такого комплекса показана на рис. 2.

Для многопозиционного восстановления высотных профилей и пространственного распределения электронной концентрации ионосферы используется совокупность приемных станций, разнесенных в пространстве.

Анализовались данные эксперимента, который проходил на нагревном стенде «Сура» 10–14 июня 2013 г. с рабочими интервалами нагрева (5 мин) и паузы (5 мин), а приемные станции, в свою очередь, находились в Нижнем Новгороде, Саратове, Кирове и Бугульме (рис. 3). Для расчета профилей электронной концентрации были использованы данные навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС и проанализированы пространственные изменения электронной концентрации на высотах 100 и 205 км.

На рис. 4, 5 приведены относительные изменения электронной концентрации в момент работы и паузы на высотах 100 и 205 км (в процентах). На рис. 4 изображена разница между нагревом и паузой  $(t_4 - t_3)/t_3 \cdot 100$  % при работе стенда в непрерывном режиме, а на рис. 5 изображена разница между нагревом и паузой  $(t_6 - t_5)/t_5 \cdot 100$  % при работе стенда с модуляцией 11 Гц.

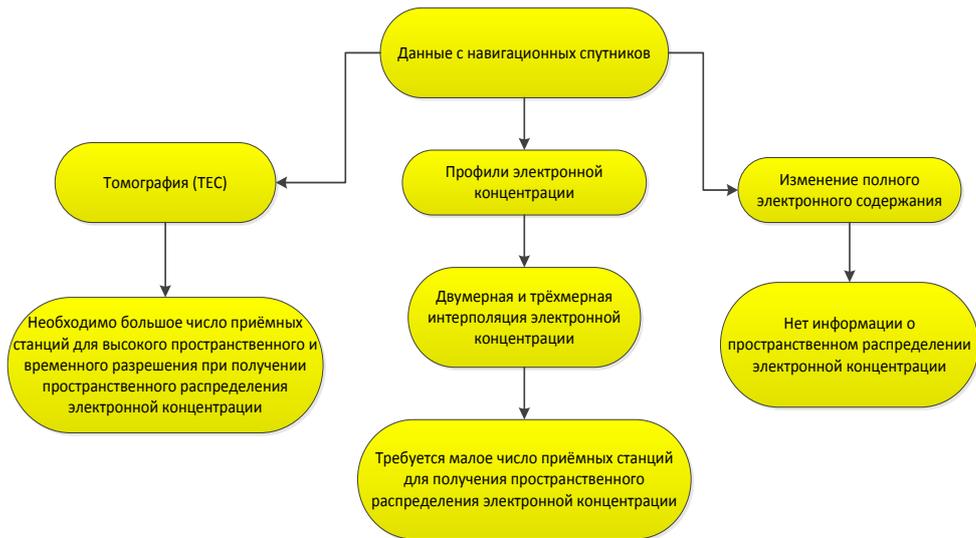


Рис. 1. Схема использования данных программно-аппаратного комплекса радиотомографии.

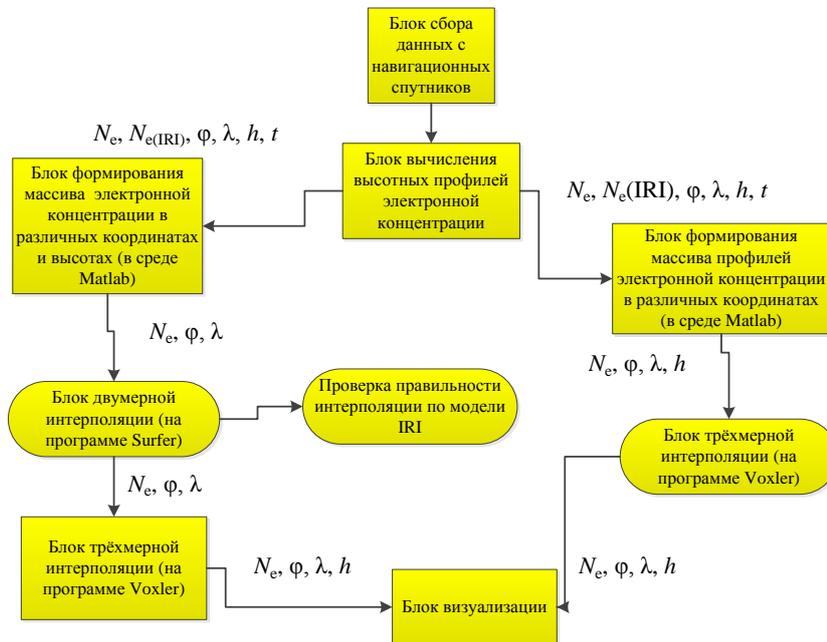


Рис. 2. Блок-схема программного модуля восстановления высотного профиля и пространственного распределения электронной концентрации.

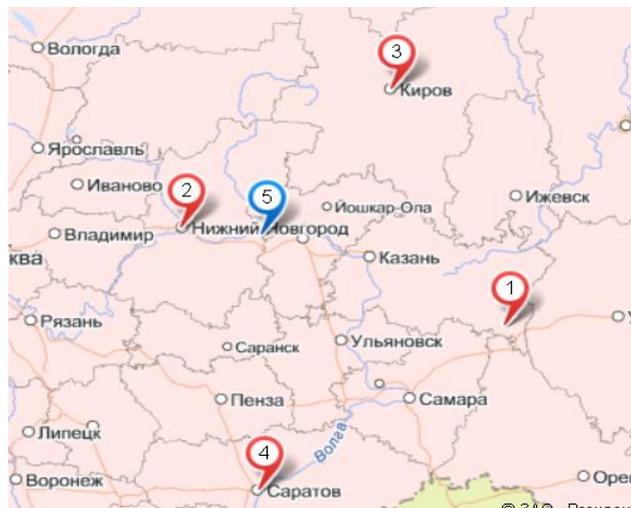


Рис. 3. Карта расположения программно-аппаратных комплексов радиотомографии: 1 – Бугульма, 2 – Нижний Новгород, 3 – Киров, 4 – Саратов, 5 – стенд «Сура».

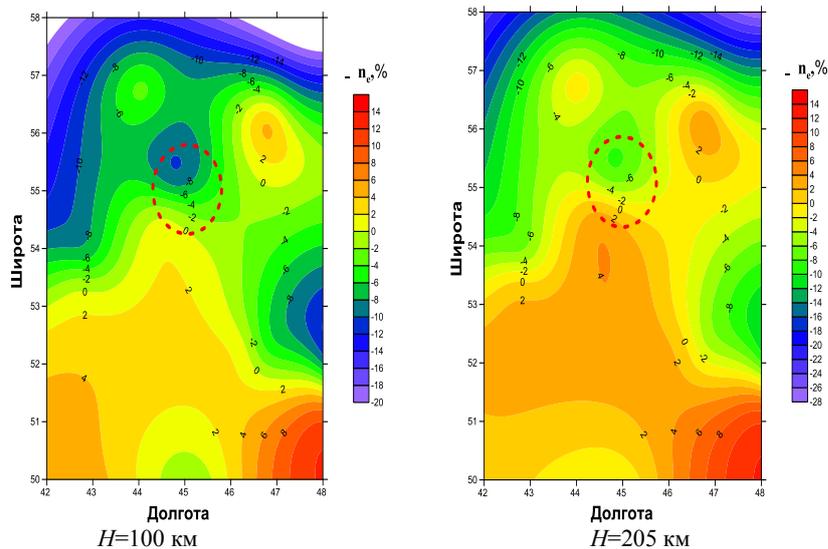


Рис. 4. 10.06.2013 г. Относительное изменение электронной концентрации на высотах 100 и 205 км в момент работы (12:27 МСК,  $f=4585$  кГц, без модуляции) –  $t_4$  и паузы (12:22 МСК) –  $t_3$ . Выделена область нагрева («Сура»).

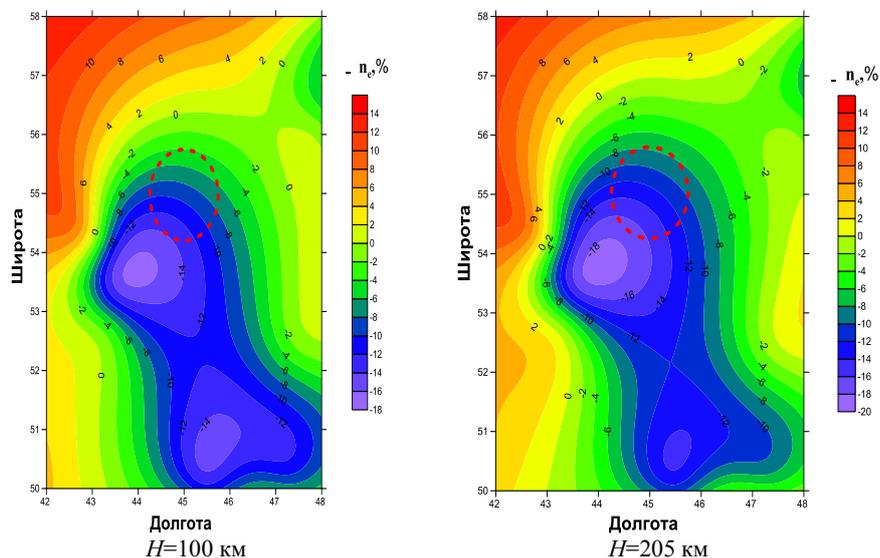


Рис. 5. 10.06.2013 г. То же в момент паузы (12:47 МСК) –  $t_6$  и работы (12:42 МСК,  $f=4585$  кГц, модуляция 11 Гц) –  $t_5$ . Выделена область нагрева («Сура»).

По результатам этого эксперимента наблюдается увеличение электронной концентрации во время работы нагревного стенда. Заметны также различия между непрерывным и импульсным режимами. В момент работы стенда в импульсном режиме (модуляция 11 Гц) наблюдается большее увеличение электронной концентрации, чем для непрерывного режима.

Особенности этой работы заключаются в том, что ранее для выявления связи изменения электронной концентрации с работой нагревных стенов вышеприведенный анализ никто не проводил. В основном использовали визуальный анализ изменения ТЕС, который не во всех случаях дает надежные результаты [Васильев, 2013]. Ранее было установлено, что можно получить достаточно значительные вариации электронной плотности (до 10–15 %), вызванные нагревом [Куницын и др., 2010].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск, СО РАН, 2006. 480 с.
- Васильев А.Е. Экспериментальное определение изменчивости полного электронного содержания фоновой и возмущенной ионосферы с использованием приемников глобальных и навигационных спутниковых систем: дисс. к.ф.-м.н. 25.00.29. М.: 2013. 116 с.
- Куницын В.Е., Падохин А.М., Курбатов Г.А., Васильев А.Е. Диагностика сигналами GPS/ГЛОНАСС воздействий мощного радиоизлучения на ионосферу // Ломоносовские чтения. Секция физики. М.: МГУ, апрель 2010. С. 193–197.
- Смирнов В.М. Метод мониторинга ионосферы Земли на основе использования навигационных спутниковых систем: автореферат дисс. д.ф.-м.н. М.: 2007. 39 с.

Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Москва, Россия