

Радиотомографические исследования ионосферы по данным навигационных спутниковых систем

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

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова 119991, Москва, Ленинские Горы, Физический факультет МГУ, nia2002@yandex.ru, kunitsyn@phys.msu.ru

Рассмотрены методы радиотомографии (РТ) с применением низкоорбитальных (НО), высокоорбитальных (ВО) навигационных систем и квазикасательного зондирования. Приведены примеры РТ-сечений ионосферы, иллюстрирующие использование систем НОРТ и ВОРТ. РТ-методы позволяют исследовать различные ионосферные структуры: провалы ионизации, волновые и квазиволновые структуры, перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), блобы ("blobs"), пятна ("patches"), пузыри ("bubbles"), "языки" ионизации, ионосферные "следы" корпускулярной ионизации и т.д.

Methods of radio tomography (RT) based on the low- and high-orbital navigational systems and radio occultation data are considered. Examples of RT imaging of the ionosphere in different regions of the world illustrate the use of low-orbital and high-orbital radio tomography (LORT and HORT, respectively). RT methods allow studying of various ionospheric structures: ionization troughs, wavelike structures (AGW), travelling ionospheric disturbances (TIDs), auroral blobs, patches, "tongues" of ionization, manifestations of particle precipitation and others

Введение

Исследования структуры ионосферы важны как для теоретического понимания физики протекающих в ней процессов, так для многих практических задач, поскольку ионосфера как среда распространения радиоволн существенным образом влияет на работу различных систем навигации, локации и связи. Существующие радиолокационные средства и ионозонды позволяют проводить лишь локальную диагностику ионосферы. Создание достаточно плотной сети традиционных средств зондирования ионосферы весьма сложно и дорого. В то же время, существующие низкоорбитальные (типа российской «Цикада» и американской «Транзит») и высокоорбитальные (GPS/ГЛОНАСС) спутниковые навигационные системы и сеть наземных приемников дают возможность проводить зондирование ионосферы по различным направлениям и применять томографические методы, т.е. позволяют восстанавливать пространственную структуру электронной концентрации ионосферной плазмы [1-6]. С начала 90-х годов действуют системы радиотомографии (РТ) на базе низкоорбитальных (НО) навигационных систем. В последние годы активно проводятся РТ исследования по данным высокоорбитальных (ВО) навигационных систем [10-13]. Для обозначения различных видов РТ здесь используются термины «низкоорбитальная» РТ и «высокоорбитальная» РТ ионосферы (НОРТ и ВОРТ).

Радиотомография ионосферы основана на использовании двухчастотного метода: при движении спутника наземными приемными станциями ведутся непрерывные измерения фазовой задержки проходящих сквозь ионосферу сигналов на двух частотах f_1 и f_2 . Используемыми данными являются соответствующие фазовые пути радиосигналов L_1 и L_2 , измеренные в длинах зондирующих волн. При условии, что частоты сигналов намного выше плазменной частоты, по этим данным можно определить интеграл от электронной концентрации вдоль траектории луча спутник-приемник (так называемое полное электронное содержание – TEC):

$$\int_l N(\vec{r}) dl = \left(\frac{L_1}{f_1} - \frac{L_2}{f_2} \right) \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \frac{c}{K} + const$$

где $K = 40,308 \text{ м}^3 / \text{с}^2$,

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ – скорость света в вакууме.

Таким образом, возникает задача томографического типа — определение функции нескольких аргументов по набору линейных интегралов от нее (вдоль лучей спутник-приемник). Существенными особенностями этой задачи являются, во-первых, наличие неизвестной фазовой константы для каждого пучка лучей (поскольку для наблюдений доступно только изменение фазы на протяжении пролета спутника в зоне видимости), и, во-вторых, недоопределенность задачи, связанная с тем, что локальную область пространства пересекает лишь небольшое количество пучков лучей спутник-приемник (а в случае ВОРТ могут существовать и области полного отсутствия данных, связанные с неравномерностью сети приемных станций). Первая проблема решается использованием фазоразностного подхода (в качестве исходных данных берутся не сами интегралы, а их разности по соседним лучам). Для решения второй можно применять итерационные алгоритмы, обеспечивающие сходимость к нормальному решению (для той или иной нормы), а также использовать специальные сетки.

Низкоорбитальная радиотомография ионосферы

Низкоорбитальные навигационные спутники, имеющие практически круговую орбиту на высоте около 1000-1150 км, и наземные цепочки приемников дают возможность получать серии НОРТ данных. В НОРТ экспериментах прием двух когерентных спутниковых сигналов (на частотах 150 и 400 МГц) и регистрация разности фаз между ними (приведенной фазы) осуществляется на сети из нескольких наземных приемных станций, расположенных вдоль траектории спутников на расстояниях порядка сотен километров. Измерения приведенной фазы в приемных точках являются данными для НОРТ реконструкции. Высокая скорость движения спутника (~7.9 км/сек) и, соответственно, быстрое по сравнению с характерными масштабами временных изменений исследуемых ионосферных процессов пересечение спутником просвечиваемой области позволяют реконструировать двумерные (высота-широта) сечения электронной концентрации в плоскости пролета спутника за времена порядка 10-20 мин. Разрешение задачи НОРТ составляет 20-30 км по горизонтали и 30-40 км по вертикали [1-3, 5, 11].

Исследования по НОРТ ионосферы и ее приложениям вызывают заметный интерес в мире, и в настоящее время более десяти научных групп в ведущих странах проводят работы в этом направлении [4-6, 11]. В течение последних двадцати лет были проведены серии успешных НОРТ-экспериментов в различных регионах Европы, Америки и Юго-Восточной Азии [4-9], которые показали широкие возможности методов РТ для исследований разнообразных ионосферных структур. Проведенные многочисленные НОРТ эксперименты показали сложность и разнообразие структуры и динамики провалов ионизации. В ходе РТ-экспериментов в Юго-Восточной Азии по низкоширотной трассе Манила-Шанхай был выявлен ряд структурных особенностей экваториальной аномалии (ЭА), обусловленных «фонтан-эффектом» [4]. НОРТ-методы позволяют проводить исследования волновых и квазиволновых структур, блобов, перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), связанных с АГВ, ионосферных «следов» высыпаний ионизирующих частиц и т.д. В настоящее время существует около десятка действующих сетей (линеек) приемников НОРТ в различных регионах мира (Россия, США, Великобритания, Скандинавия и Финляндия, Аляска, Гренландия, Карибский регион), которые активно используются для исследовательских целей.

Создана НОРТ система в Индии, модернизируется НОРТ система в Юго-восточной Азии. Российская транконтинентальная РТ-система (Сочи – арх. Шпицберген), состоящая из 9 приемных станций, является самой протяженной в мире (около 4000 км) и не имеет аналогов [9]. Уникальность российской НОРТ системы состоит в том, что данные наблюдений охватывают область ионосферы от авроральных (зоны полярной шапки) до низких широт. В качестве примера на рис.1. приведено НОРТ-сечение ионосферы между Сочи и Шпицбергом. В районе Шпицбергена (78° - 79°) зарегистрированы квазиволновые возмущения с масштабами порядка 50 км. В центральной области реконструкции (59° - 65°) заметно понижение электронной концентрации. На юге РТ-сечения (42° - 55°) хорошо видны квазиволновые структуры с масштабами около ~ 100 - 150 км.

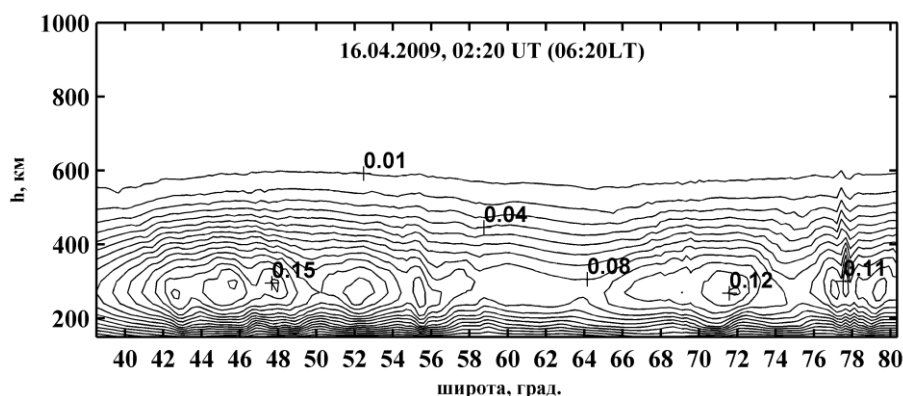


Рис.1. Пример РТ-сечения (Сочи-Баренцбург) по данным 16 апреля 2009г. (02:20 UT)

Пример НОРТ-сечения провала ионизации ($\sim 67^{\circ}$ - 68°) представлен на рис.2. Квазиволновые возмущения зарегистрированы к северу от провала. Фрагмент РТ-реконструкции ионосферы (Сочи-Баренцбург) показан на рис.3. Провал ионизации выявлен в районе 68° и около 4 максимумов ПИВ с масштабами 50-100 км обнаружены к югу от провала. Исходя из геометрии эксперимента и характерного угла наклона ПИВ, можно предположить, что данные возмущения движутся с севера на юг. Таким образом, сложная структура ионосферной плазмы наблюдается даже для невозмущенных геофизических условий (индекс Кр не превышал 2.7 для приведенных примеров НОРТ-реконструкций).

НОРТ позволяет восстанавливать не только ионосферные неоднородности естественного происхождения, но и обнаруживать ионосферные возмущения, порождаемые антропогенными источниками. В частности, возмущения, вызванные стартами ракет, промышленными взрывами, мощным КВ излучением [5, 11]. Метод НОРТ позволяет также определять потоки плазмы, рассматривая последовательные во времени РТ-сечения ионосферы [8]. При наличии нескольких линеек приемников, расположенных на расстояниях порядка нескольких сотен километров друг от друга, можно восстанавливать трехмерную структуру ионосферы. Основным существенным ограничением НОРТ является необходимость создания систем со многими линейками приемников.

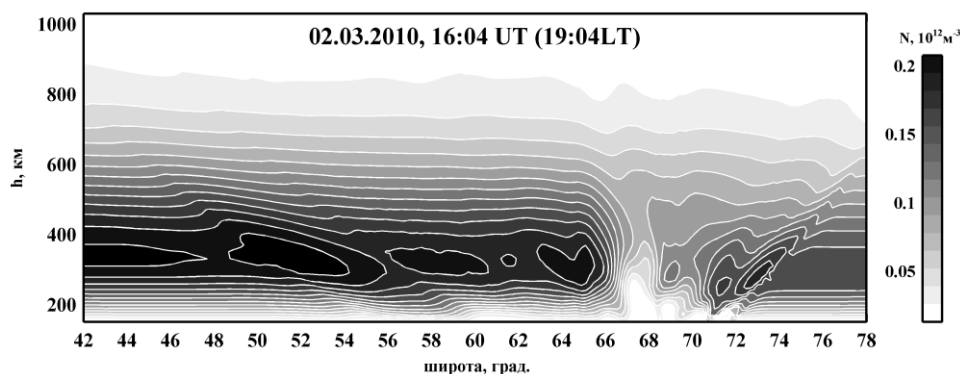


Рис.2. Пример РТ-сечения (Сочи-Баренцбург) с провалом ионизации по данным 2 марта 2010г. (16:04 UT)

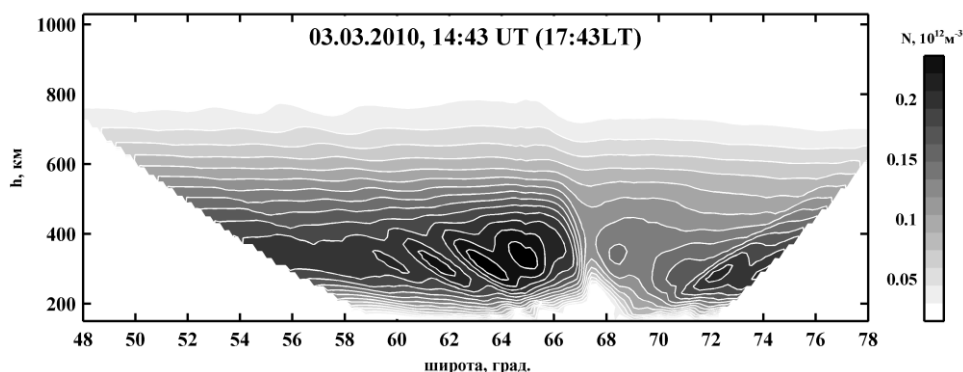


Рис.3. Фрагмент РТ-сечения (Сочи-Баренцбург) с провалом и ПИВ по данным 3 марта 2010г. (14:43 UT)

Высокоорбитальная радиотомография ионосферы

С развертыванием наземной сети приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) появилась возможность использовать непрерывные измерения параметров проходящих через ионосферу навигационных сигналов для регионального или глобального мониторинга ионосферы. Помимо американской системы GPS и российской ГЛОНАСС в ближайшие годы планируется развертывание и других систем, в частности, европейской (Galileo) и китайской. Информация, постоянно получаемая сетями приемников GNSS, дает возможность постановки задач реконструкции распределения электронной плотности в ионосфере. Существует ряд региональных и глобальных сетей приемников GNSS, в частности, сеть IGS (International Geodetic Service) насчитывает более двух тысяч приемников. Входными данными для задач мониторинга ионосферы являются измерения фазы радиосигнала (фазового пути) при прохождении им пути от спутника до наземной станции приемника на двух рабочих частотах. Для системы GPS эти частоты составляют $f_1 = 1575.42 \text{ МГц}$ и $f_2 = 1227.60 \text{ МГц}$.

Основной особенностью обратных задач радиозондирования по данным GNSS является их высокая размерность. Сравнительно низкая угловая скорость высокоорбитальных спутников GNSS определяет необходимость учета временной изменчивости ионосферы, что приводит к постановке задачи 4D томографии (три пространственные координаты и время). Четырехмерность задачи делает особенно существенной неполноту исходных данных – лучи спутник-приемник проходят не через все точки пространства, а в областях с малым числом приемников образуются области отсутствия данных, что требует разработки специальных подходов [5, 10-13]. Пространственное разрешение ВОРТ заметно ниже, чем в случае НОРТ, как правило,

горизонтальное разрешение составляет около 100 км. На очень плотных сетях приемников (Япония, Калифорния) можно достичь разрешения в 30-50 км.

Другой особенностью является неполнота данных. Хотя число лучей спутник-приемник велико, существуют области пространства, которые они не пересекают, таким образом, в областях с малым числом приемников образуются зоны отсутствия данных. Четырехмерность задачи делает неполноту исходных данных особенно существенной – пучки лучей образуют всего лишь двумерные поверхности в четырехмерном пространстве, которые могут даже не пересекаться. В этой ситуации для получения решения необходимо обеспечить, чтобы оно изменялось достаточно плавно, что может быть достигнуто либо использованием сеток с шагом, тем или иным способом согласованным с плотностью данных, либо выбором наиболее гладкого решения. Для поиска гладкого решения применяются специальные итерационные алгоритмы, обеспечивающие сходимость к нормальному решению в смысле некоторой соболевской нормы [5, 10-13]. Эти алгоритмы были протестированы как на моделях, так и на ВОРТ-данных (в том числе при сравнениями с результатами независимых измерений – НОРТ и ионозондовых) и показали способность не только адекватно реконструировать распределение электронной плотности в областях достаточно густой сети приемных станций, но и гладко продолжать решение в области отсутствия данных.

Были проведены ВОРТ исследования ионосферы различных широт в различных гелиогеофизических условиях. Для иллюстрации результатов применения разработанных методов ВОРТ приведем примеры реконструкций. На рис. 4. показан пример эволюции ионосферного провала над Европой вечером 17 апреля 2003 г. На картах ТЕС и меридиональных вертикальных сечениях (вдоль) 21° в.д.) видно изменение ширины провала и его структуры на фоне общего ночного понижения электронной концентрации. Рис.5. демонстрирует аномальные повышения электронной концентрации (до $3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$) над Арктикой в период сильнейшей магнитной бури 29-31 октября 2003 г. Увеличение электронной концентрации на ночной стороне связано с конвекцией и переносом плазмы с дневной стороны на ночную. Области повышенной ионизации имеют вид «языков» с неоднородной «пятнистой» структурой (рис.5., сверху), которая показана также на вертикальных разрезах (рис.5., снизу). Разрезы сделаны вдоль линий, изображенных на картах ТЕС (рис.5., сверху). По-видимому, такая структура неоднородностей связана с неустойчивостью ионосферной плазмы и появлением квазиволновых структур. На рис. 6 показаны кольцевые (вокруг полюса) структуры (авроральный овал) в период геомагнитной бури в декабре 2006 г., полученные по результатам ВОРТ реконструкций ионосферы над Арктикой.

Разрешающая способность ВОРТ систем, т.е. влияние числа и положения приемников GNSS на масштабы поддающихся реконструкции структур, была исследована путем численного моделирования. Использовалась серия модельных распределений, представляющих собой периодические широтно-долготные структуры различных масштабов. По реконструкциям для этих распределений можно сделать выводы о том, что в областях, где эти структуры успешно реконструируются, разрешающая способность системы ВОРТ не меньше, чем использованный масштаб. На рис. 7. представлен пример результата такого моделирования. Приведена ВОРТ-реконструкция на базе существующей глобальной приемной сети IGS для модельного распределения ТЕС, которое представляло собой набор положительных локальных неоднородностей с масштабами в 4° , расположенных в шахматном порядке. На основе этого примера можно сделать вывод о том, что разрешающая способность в 4° уверенно достигается для регионов Северной Америки, Европы и Японии, и, на границе возможности – для Австралии.

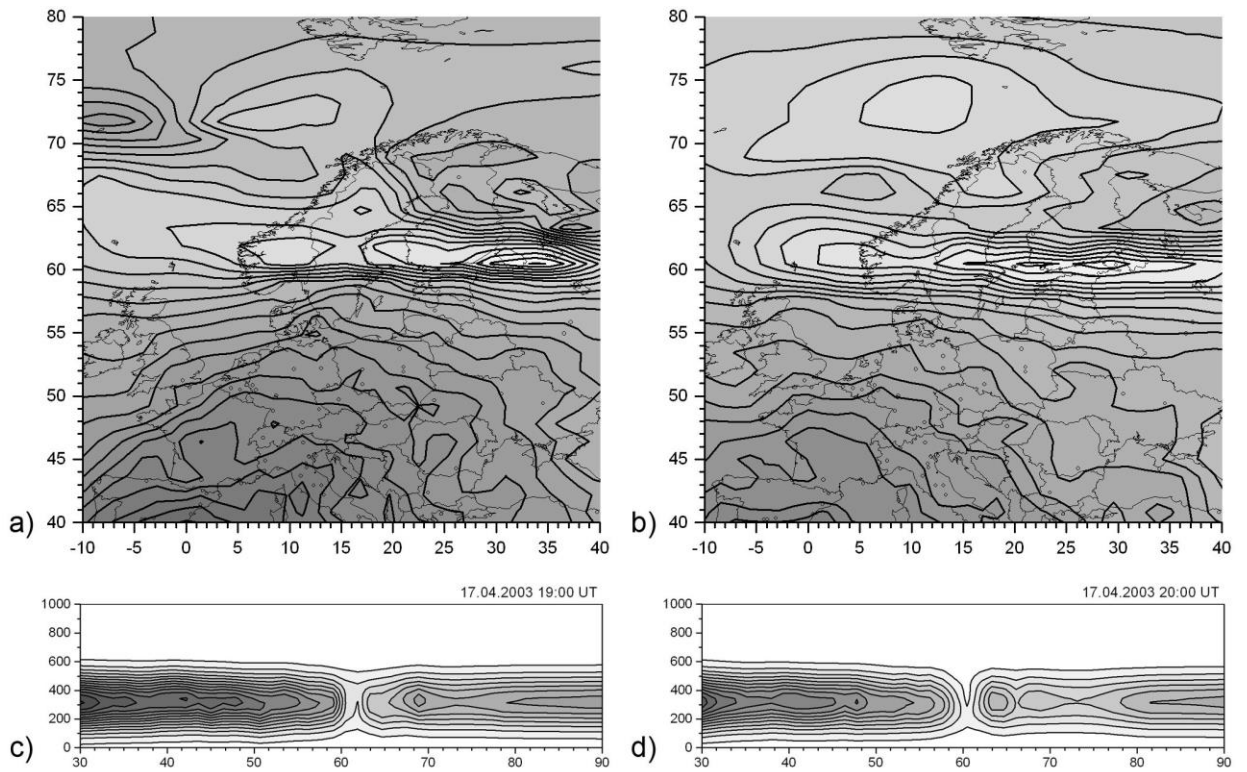


Рис.4. ВОРТ-реконструкция ионосферы над Европой 17.04.2003: (а, с) 19:00 UT и (b, d) 20:00 UT. Сверху (а,б)- карты ТЕС в координатах широта-долгота, цветовая шкала 0÷ 35 TECU; снизу (с, d)- вертикальные сечения ионосферы вдоль 21° восточной долготы, цветовая шкала 0 ÷ 0.6·10¹² м⁻³.

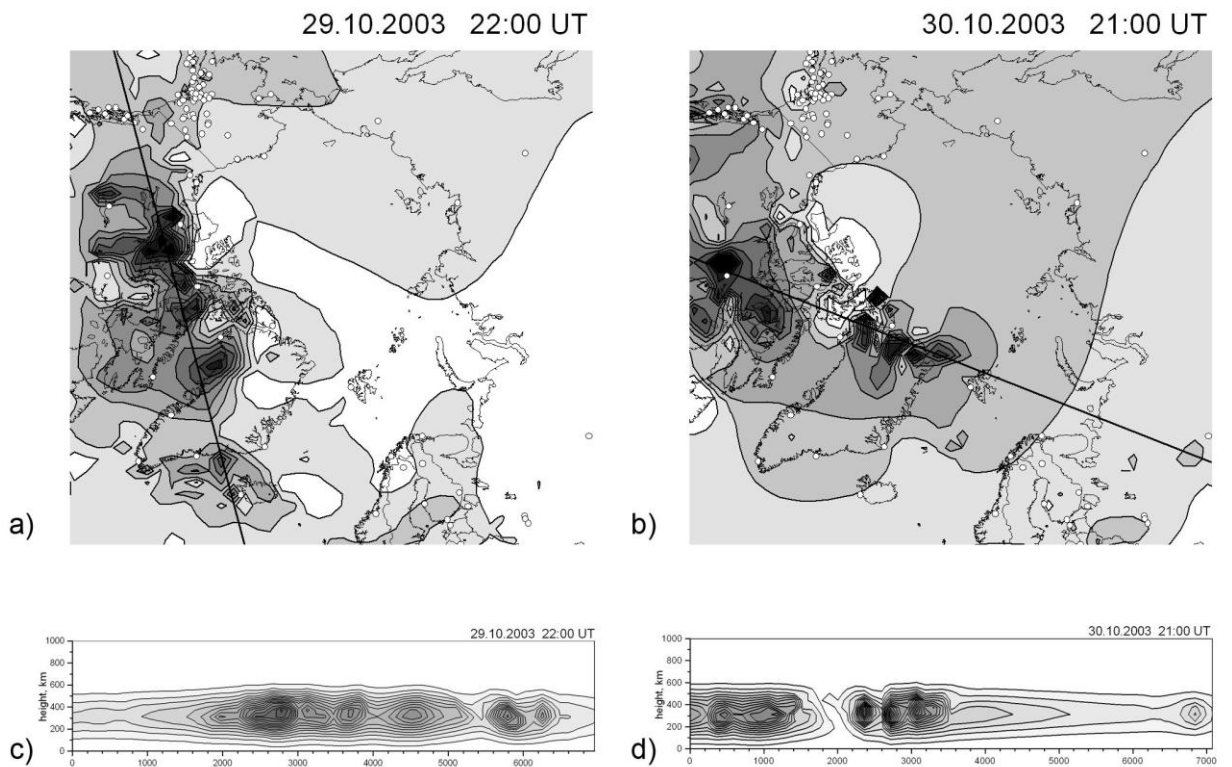


Рис.5. ВОРТ Реконструкции ионосферы над Арктикой, 29 и 30 октября 2003г. Сверху (а, б) – карты ТЕС, снизу (с, d) – вертикальные сечения вдоль линий, обозначенных на картах ТЕС. Черно-белая шкала: от 0 до 60 TECU на верхних рисунках, от 0 до 2.5·10¹² м⁻³ на нижних рисунках.

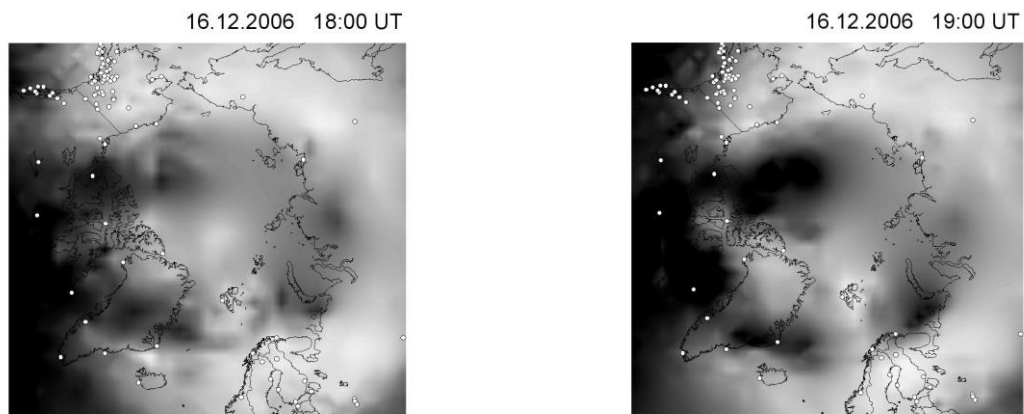


Рис.6. Карты вертикальных ТЕС над регионом Арктики, черно-белая шкала (0-5) TECU

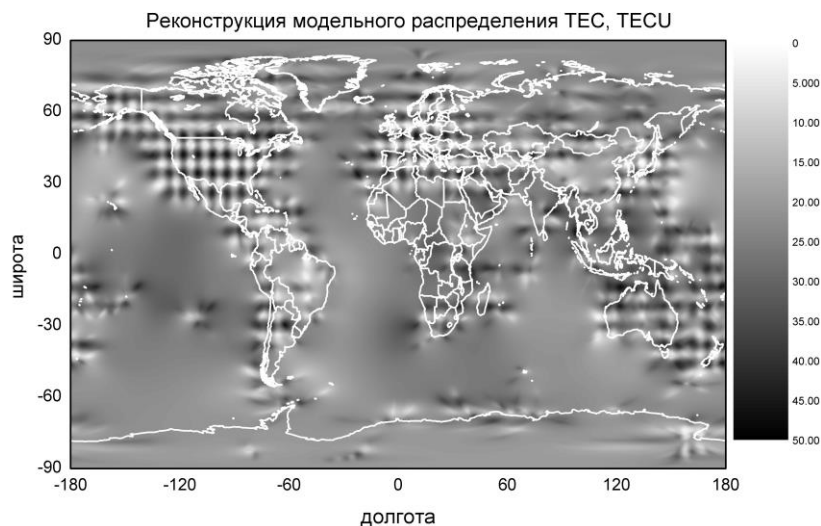


Рис.7. ВОРТ-реконструкция модельного распределения ТЕС на базе существующих приемников сети IGS.

Заключение

Радиосигналы, непрерывно излучаемые спутниковыми навигационными системами, предоставляют широкие возможности для осуществления исследований ионосферной плазмы методами радиотомографии. При этом использование низкоорбитальных и высокоорбитальных систем приводит к двум существенно различающимся задачам. НОРТ позволяет получать «мгновенные» двумерные сечения ионосферы с высоким разрешением (20-30 км). ВОРТ дает четырехмерные (пространственно-временные) распределения электронной плотности с меньшим разрешением (до 30-50 км), напрямую зависящим от плотности сети приемных станций в регионе.

С помощью методов радиотомографии получены реконструкции ионосферы приэкваториальных, средних, субавроральных и авроральных широт, были исследованы различные ионосферные структуры: провалы ионизации, авроральный овал, волновые и квазиволновые структуры, перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), «глобы», «пятна», «пузыри», «языки» ионизации, ионосферные «следы» корпускулярной ионизации и т.д.

Литература

1. Андреева Е.С., Галинов А.В., Куницын В.Е. и др. Томографическая реконструкция провала ионизации ионосферной плазмы // Письма в ЖЭТФ, 1990, Т.52, №3, С.783-785.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991.
3. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D., Andreeva E.S. et al. Radiotomographic Investigations of Ionospheric Structures at Auroral and Middle Latitudes // Ann. Geophys. 1995. V.13, P.1351-1359.
4. Pryse S.E. Radio tomography: A new experimental technique // Surv. in Geophys. 2003. V.24.-P.1-38.
5. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Наука. 2007. 336с.
6. G.S. Bust and C.H. Mitchell. History, current state, and future directions of ionospheric imaging // Reviews of Geophysics, 2008, **46**, RG1003, pp.1-23.
7. E.S. Andreeva, S.J. Franke, K.C. Yeh and V.E. Kunitsyn. Some features of the equatorial anomaly revealed by ionospheric tomography // *Geophys. Res., Lett.*, 2000, **27**, pp. 2465-2468.
8. V.E. Kunitsyn, E.S. Andreeva, S.J. Franke and K.C. Yeh. Tomographic investigations of temporal variations of the ionospheric electron density and the implied fluxes // *Geophys. Res. Lett.*, 2003, V.**30**, pp.1851-1854.
9. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. и др. Трансконтинентальная радиотомографическая система. Результаты первых ионосферных измерений // Вестник МГУ. Физика, астрономия. 2009. №6, С.102-104.
10. Куницын В.Е., Андреева Е.С., Кожарин М.А., Нестеров И.А. Радиотомография ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем. // Вестник МГУ. Физика, астрономия. 2005. №1. С.74-84.
11. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С., И.А.Нестеров. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы // Успехи физических наук. 2010. Т.180, №5, С. 548-553.
12. Nesterov I.A., Kunitsyn V.E. GNSS radio tomography of the ionosphere: the problem with essentially incomplete data // Adv. Space Res. 2011. V.47, P.1789-1803.
13. Куницын В. Е., Нестеров И. А., Падохин А. М., Туманова Ю. С. Радиотомография ионосферы на базе навигационных систем GPS/ГЛОНАСС // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56. № 11. С. 1285–1297.