

## ЛУЧЕВАЯ РАДИОТОМОГРАФИЯ ИОНОСФЕРЫ

Е.С. Андреева

## RAY RADIOTOMOGRAPHY OF THE IONOSPHERE

E.S. Andreeva

В докладе рассмотрен метод лучевой радиотомографии (РТ) ионосферы. Представлен обзор РТ-исследований структуры ионосферы в различных регионах мира (Европа, Северная Америка, Южная и Юго-Восточная Азия) на базе низкоорбитальных спутниковых навигационных систем. Обсуждаются возможности, ограничения и перспективы лучевой РТ (проблемы единственности, краевые эффекты, различные методы и алгоритмы и т. д.).

A method of ray radiotomography (RT) of the ionosphere is considered in the paper. A review of RT investigations of ionosphere structure carried out in different regions of the world (Europe, North America, South and South-East Asia) using low-orbital satellite navigational systems is presented. Possibilities, limitations and perspectives of ray RT (problems of uniqueness, edge effects, different methods and algorithms etc.) are discussed.

**Введение**

Исследования по лучевой радиотомографии (РТ) ионосферы и ее приложениям вызывают заметный интерес в мире. С начала девяностых годов были проведены серии успешных экспериментов по реконструкции структуры ионосферной плазмы с помощью томографических методов в различных регионах Европы, Америки, Юго-Восточной Азии, Австралии [1–13]. С тех пор лучевая РТ стала одним из основных инструментов исследования распределений электронной плотности в ионосфере. В докладе представлены и обсуждаются результаты исследований структуры и динамики ионосферы методом лучевой РТ по данным экспериментов 1990–2005 гг., выполненных сотрудниками МГУ, ПГИ РАН и совместно с зарубежными коллегами.

Метод лучевой РТ ионосферы основан на регистрации и анализе радиосигналов двух когерентных частот 150 и 400 МГц низкоорбитальных (НО) навигационных российских спутников типа «Цикада» или американских «Транзит» в нескольких приемных точках, расположенных вдоль траектории восходящих или нисходящих витков орбит спутника и на расстояниях порядка сотен километров. Данные навигационные спутники летают на высотах 1000–1150 км, имеют близкие полярным орбиты и период обращения около 105 мин. Высокая скорость движения спутника (~7.9 км/с) и соответственно быстрое, по сравнению с характерными масштабами временных изменений исследуемых ионосферных процессов, пересечение спутником просвечиваемой области позволяют реконструировать двумерные сечения электронной концентрации в плоскости пролета спутника, характерная длительность РТ регистрации составляет 10–15 мин. Важными достоинствами метода лучевой РТ ионосферы является сравнительная простота его реализации и, при наличии достаточного количества приемных точек, высокое пространственно-временное разрешение. Измерения приведенной фазы  $\varphi$  (т. е. разности фаз между радиосигналами 150 и 400 МГц) в приемных точках являются данными для томографической реконструкции, причем измеряемые значения обусловлены только вкладом ионосферы и пропорциональны интегралу от электронной концентрации  $N$  вдоль лучей  $L$  между приемником на Земле и пере-

датчиком на спутнике, но с точностью до неизвестной начальной фазы  $\varphi_0$ :

$$\gamma \lambda r_e \int_L N ds = \varphi + \varphi_0, \quad (1)$$

где  $r_e$  – классический радиус электрона,  $ds$  – элемент длины луча,  $\lambda$  – длина зондирующей волны,  $\gamma$  – коэффициент пропорциональности порядка единицы, определяемый выбором опорной частоты, на которой измеряется приведенная фаза. Погрешности в оценке начальных фаз  $\varphi_0$  у разных приемников приводят к противоречивости и несогласованности данных и, как результат, – к низкому качеству реконструкций с существенными искажениями. Поэтому был разработан метод фазоразностной РТ, т. е. РТ по разности линейных интегралов на близких лучах, не требующий определения начальной фазы [1–4]. Для фазовой РТ в отличие от фазоразностной нужна особая процедура определения начальной фазы для каждого из приемников, которая должна быть включена в процесс восстановления. В настоящее время реализованы три варианта РТ по данным линейных интегралов (1) [1–6]:

- фазовая РТ с оценкой начальной фазы – иными словами, РТ по линейным интегралам, включающим неизвестные начальные фазы, определение (оценка) которых является дополнительной задачей;
- РТ по относительной фазе – при этом из всех лучевых интегралов системы с одинаковой начальной фазой вычитается один лучевой интеграл с той же начальной фазой;
- фазоразностная РТ, т. е. РТ по разности линейных интегралов на близких лучах – в этом случае не требуется определение начальных фаз.

После дискретизации задача томографической реконструкции сводится к решению системы линейных уравнений (СЛУ). Более подробно детали построения СЛУ (выбор аппроксимаций, ошибки аппроксимаций, их влияние на решение и т. д.) и методы их решения рассмотрены в работах [2–4, 14]. Заметно лучшие результаты дает фазоразностная РТ, которая обладает более высокой чувствительностью по сравнению с фазовыми методами, что подтверждается экспериментальными РТ-реконструкциями [3, 4, 8]. В частности, с практи-

ческой точки зрения, к одним из достоинств метода фазоразностной РТ следует отнести возможность простой интерполяции экспериментальной доплеровской частоты при разрывах в регистрации в отличие от фазовых методов. В общем случае в задачах лучевой РТ ионосферы путь интегрирования  $L$  определяется траекторией луча и зависит от искомого распределения  $N$ . Проведенные оценки и компьютерное моделирование [3, 4] показали, что рефракционные эффекты определяются вариациями  $N$  и малосущественны до значений максимальной концентрации  $\sim (1.5 \div 2.5) 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . В случае учета рефракции решение нелинейной томографической задачи можно реализовать в виде решения последовательности линейных задач, что сводится к итерационной процедуре, где для расчета каждого последующего приближения электронной концентрации используется траектория, полученная из приближения электронной концентрации на предыдущем шаге [3, 4]. Рефракция приводит к отклонению луча от прямого и ограничивает размер дискрета и разрешение задачи лучевой РТ в линейной постановке до 30–40 км по горизонтали и до 20–30 км по вертикали. Другим ограничением является эффект дифракции радиоволн, также ограничивающий снизу размер дискрета около 10 км (радиус Френеля в данном случае составляет около 1 км). Таким образом, пространственное разрешение метода лучевой РТ ионосферы можно улучшить до 10–20 км, если учитывать рефракцию зондирующих лучей.

Принципиальным ограничением для всех вариантов РТ является неединственность задачи. В линейных задачах неединственность проявляется в существовании фантомов – отличных от нуля знакопеременных распределений, интегралы от которых по всем лучам равны нулю. Будучи добавленными к реконструированной искомой функции, фантомы искажают ее, но при этом оставляют без изменений сами значения всех интегралов по всем проекциям. Примеры таких «невидимых» фантомов рассмотрены в [14], причем размер деталей структуры финитного фантома уменьшается с ростом числа проекций и может стать сопоставимым с разрешением системы. Поэтому при большом числе приемников (более 5–7) фантомы представляют собой достаточно экзотичные знакопеременные образования с мелкой структурой и специфической симметрией, которая определяется приемной системой. В природе существование подобных структур маловероятно.

### Радиотомография исследования ионосферы в различных широтных областях

Впервые в мире экспериментальные РТ-реконструкции главного ионосферного провала были получены в марте–апреле 1990 г. сотрудниками МГУ и ПГИ РАН. Они представлены в изолиниях в единицах  $10^{12} \text{ м}^{-3}$  на рис. 1. Проведенные многочисленные эксперименты показали сложность и разнообразие форм провала, причем его ширина, наклон и глубина варьируются в широких пределах [1–4, 8]. На рис. 2 приведен один из примеров узкого наклонного провала. Верхняя реконструкция получена по данным трассы Кордова–Делта на Аляске

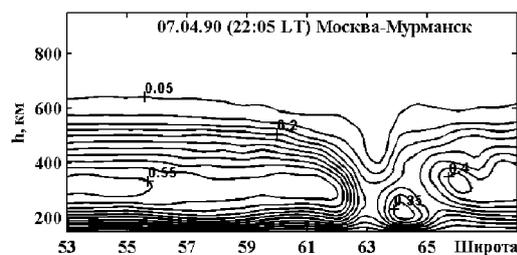


Рис. 1, а. РТ сечение ионосферы (Москва-Мурманск) 07.04.1990 г. в 22:05 LT.

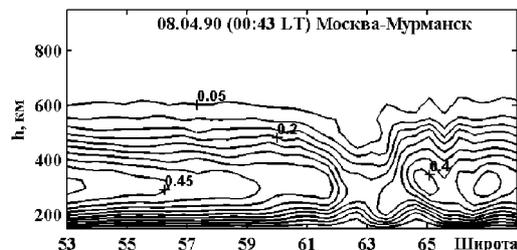


Рис. 1, б. РТ сечение (Москва-Мурманск) 08.04.1990 г. в 00:43 LT.

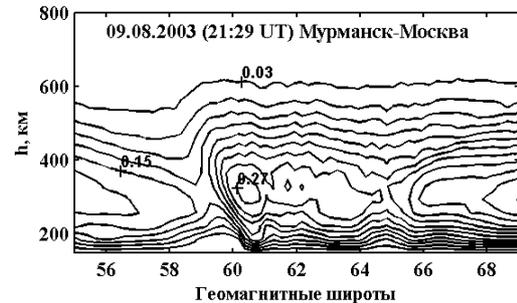
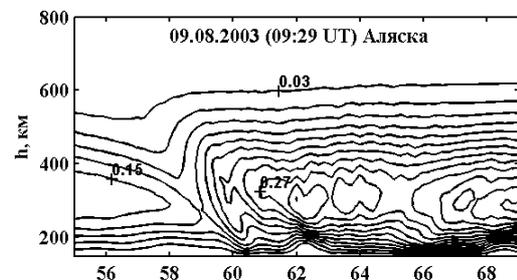


Рис. 2. РТ-сечения ионосферы 09.08.2003 г. в районе Аляски в 09:29 UT и по линии Москва–Мурманск в 21:29 UT.

[<http://www.harp.alaska.edu/harp/data.fcgi>], а нижняя – спустя 12 ч по данным российской РТ-цепочки между Москвой и Мурманском, причем координаты приемников таковы, что российская цепочка и приемная цепочка на Аляске расположены на противоположных сторонах Земли с разницей по времени около 12 ч. Хорошо видно, что РТ-сечения ионосферы качественно похожи: на обеих реконструкциях хорошо виден узкий наклонный провал, причем северный край провала имеет характерный выступ, а к северу от провала наблюдаются квазиволновые возмущения. Более того, через 7 ч качественное подобие реконструкций сохраняется (рис. 3): провал исчез, ионосфера стала практически однородной. Таким образом, сложная структура ионосферы практически не менялась на всем многочасовом временном интервале (т. е. наблюдалось «вращение» Земли относительно квазистационарной ионосферы). Подобные случаи довольно редки и как пра-

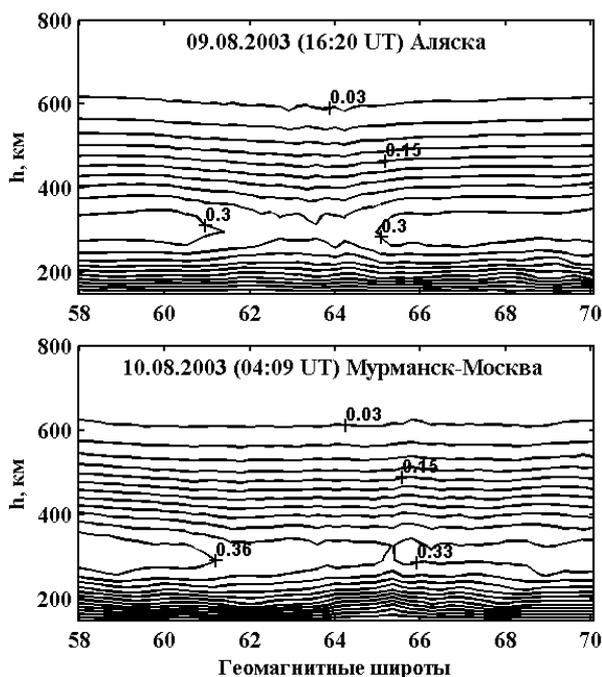


Рис. 3. РТ-сечения ионосферы в районе Аляски 09.08.2003 г. в 16:20 UT и по линии Москва–Мурманск 10.08.2003 г. в 21:29 UT.

вило наблюдаются в спокойных геомагнитных условиях (для данных примеров  $K_p$  не превышает 2).

Неоднократно на РТ-сечениях наблюдались такие известные волновые структуры, как перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). На рис. 4–5 приведены примеры ПИВ, зарегистрированных в разное время. На рис. 4 с южной стороны хорошо видны ПИВ (район Скандинавии) с характерным углом наклона около  $45^\circ$ . Подобные ПИВ нередко наблюдаются на РТ-сечениях [3, 4, 6, 13]. На рис. 5 показаны ПИВ на трассе Москва–Архангельск [12].

В докладе рассмотрены ионосферные проявления нескольких крупнейших бурь периода 1990–2004 гг. Структура ионосферы в периоды возмущений была исследована методами РТ в авроральной, субавроральной и среднеширотной ионосфере над северо-западом России, северо-востоком США, востоком Канады, Аляской и Европой. Выявлен ряд особенностей структуры распределения электронной плотности в возмущенной ионосфере, не характерных для спокойных периодов. В частности, во время сильных возмущений в реконструкциях наблюдались многоэкстремальные структуры с «пятнами» ионизации, а также резкие градиенты в виде «стенок» электронной концентрации; выявлены тонкие (поперечная протяженность порядка нескольких километров) структуры повышенной электронной плотности, вытянутые вдоль магнитных силовых линий и имеющие протяженность по высоте около сотен километров. Обнаружена сложная структура ионосферного провала со смещением полярной стенки к экватору и ее наклоном, неоднократно наблюдались расслоения провала. В докладе проанализированы реконструкции с волновыми эффектами высыпаний низкоэнергетичных частиц.

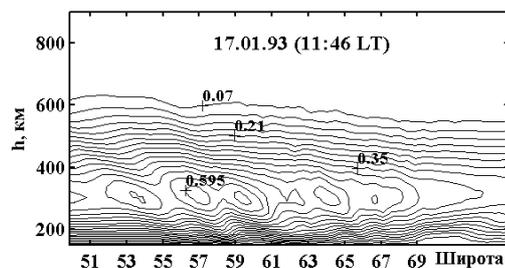


Рис. 4. РТ-реконструкция (район Скандинавии и Финляндии) 07.10.1993 г. в 11:46 LT.

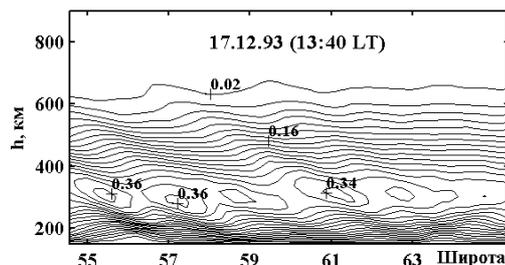


Рис. 5. РТ-реконструкция (Москва–Архангельск) 17.12.1993 г. в 13:40 LT.

В качестве примера на рис. 6 представлено РТ-сечение ионосферы по трассе Москва–Баренцбург (Шпицберген) в период геомагнитной бури 29–31 октября 2003 г., которая относится к классу исключительно мощных. За два дня 29–30 октября было зафиксировано три трехчасовых интервала с максимально возможным  $K_p = 9$  (это случилось впервые в истории  $K_p$ -индексов). Как видно из реконструкции (рис. 6), ночью наблюдается сложная многоэкстремальная структура с «пятном» повышенной электронной концентрации на уровне широты около  $70^\circ$  (максимальное значение порядка  $1.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , что совершенно не типично для субавроральных широт). Сложное сечение ионосферы с достаточно узкой практически вертикальной структурой в районе  $60^\circ$  наблюдалось 27 июля в 05:46 UT 2004 г. ( $K_p = 8.7$ ) в районе Аляски (рис. 7).

В докладе представлены результаты РТ-исследований структуры и динамики низкоширотной ионосферы, которые были получены в ходе совместных работ университетов МГУ, Иллинойса, Тайваня и Уханя. В области приэкваториальных широт (приемная трасса Шанхай–Манила) был выявлен ряд новых структурных особенностей экваториальной аномалии (ЭА) [9–11]:

- сформировавшееся ядро ЭА ориентировано вдоль направления магнитного поля Земли;
- существует значительная асимметрия между экваториальным и полярным краями ЭА;
- обнаружены характерные чередующиеся области «расширение–сужение» толщины ионосферы в широтном диапазоне  $15\text{--}31^\circ$ ;
- в области ядра ЭА происходит «продавливание» и «опускание» нижнего края ионосферного слоя, т. е. проникновение потока плазмы из F-области в нижние слои в районе широт  $\sim 25\text{--}28^\circ$ ; в области за ядром ЭА ( $\sim 28\text{--}31^\circ$ ) образуется «перетяжка».

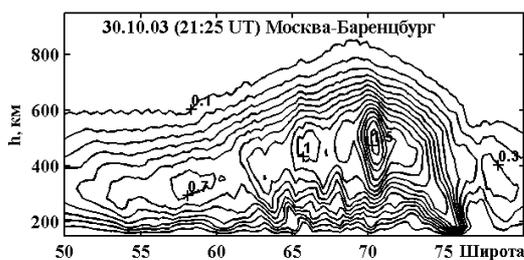


Рис. 6. РТ-сечение ионосферы между Москвой и Баренцбургом (Шпицберген) в период магнитной бури 30.10.2003 г. в 21:25 UT.

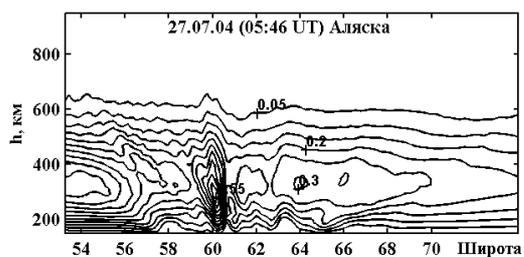


Рис. 7. РТ-сечение ионосферы в районе Аляски в период магнитной бури 27.07.2004 г. в 05:46 UT.

Наблюдаемые структурные особенности могут быть интерпретированы на основе анализа потоков и скоростей плазмы в районе ЭА, обусловленных «фонтан-эффектом». Существующая восточно-западная компонента электрического поля и квази-горизонтальное магнитное поле в районе магнитного экватора приводят к вертикальному дрейфу плазмы с вертикальной и северной составляющими скорости. В северном направлении происходит увеличение потока плазмы, который приобретает все большую составляющую вдоль силовых линий магнитного поля. Вследствие «загибания» к Земле силовых линий магнитного поля происходит и «поворот» вниз потока плазмы вдоль силовых линий. Здесь, в области, где поток ориентирован почти вдоль линий, происходит увеличение плотности плазмы и образование ядра ЭА. Один из примеров РТ-реконструкции ЭА представлен на рис. 8, на котором хорошо видно ядро ЭА, ориентированное вдоль направления магнитного поля Земли (штрихами отмечены магнитные силовые линии). Асимметрия ядра ЭА обусловлена тем, что если у северной границы ядра поток плазмы направлен вдоль силовых линий, то у южной поток имеет поперечную магнитному полю направленную вверх компоненту, что приводит к «размазыванию» южной части ядра. Наличие направленной вверх компоненты потока с южной стороны ядра обуславливает образование хвоста, в котором плазма втекает с юга и снизу в ядро ЭА. Вертикальная компонента потока плазмы в приэкваториальной области приводит к расширению ионосферы к северу. Последующее «загибание» к Земле силовых линий магнитного поля приводит к «повороту» вниз потока плазмы, вдоль силовых линий и к сужению ионосферы. В области ядра ЭА происходит «продавливание» и «опускание» нижнего края ионосферного слоя под воздействием потока плазмы вдоль силовой линии.

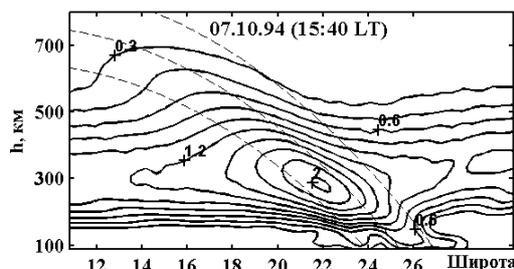


Рис. 8. РТ-реконструкция F- и E- областей северного гребня экваториальной аномалии между Манилой и Шанхаем 07.10.1994 г. в 15:40 LT.

Это хорошо видно на РТ-реконструкциях в области E ( $h$  от 90 до 150 км) на широтах 24–28° N (рис. 8). В области продавливания и опускания нижнего края ионосферного слоя происходит, по-видимому, торможение плазмы и последующий дрейф «в скрещенных полях» со сменой направления дрейфа. Иными словами, происходит «поворот» потока плазмы почти на 90°, т. е. движение преимущественно вдоль магнитного поля сменяется после торможения движением поперек магнитного поля. Такая структура потока и приводит к образованию области типа «перетяжки», наблюдаемой после ядра ЭА в районе широт 28–31° (рис. 8). В докладе представлены примеры типичного временного поведения ЭА (рост концентрации ЭА в районе полудня, смещение ЭА к северу и убывание плотности к вечерним часам) и необычного поведения ЭА (например, концентрация иногда оставалась почти постоянной в течение 5–7 ч, убывала с полудня или возрастала в вечерние часы – «послезакатный» эффект и т. д.).

Метод лучевой РТ позволяет не только получать двумерные сечения концентрации плазмы, но и определять потоки плазмы, рассматривая последовательные во времени РТ-сечения [15]. На рис. 9 приведен один из примеров определения потоков плазмы (произведение плотности на скорость плазмы), хорошо иллюстрирующий явление фонтан-эффекта.

Проведены РТ-исследования сильных возмущений ионосферы, вызванных антропогенными факторами, – в частности, возмущений, вызванных стартами ракет [3, 4], промышленными взрывами [16], мощным КВ-излучением [3, 4].

В ходе ряда экспериментов были проведены сопоставления РТ-результатов с данными радаров некогерентного рассеяния. Один из первых таких экспериментов был проведен осенью 1993 г. – Российско-Американский томографический эксперимент (RATE'93) по сопоставлению результатов РТ-реконструкций с данными радара некогерентного рассеяния в Миллстоун Хилл (США).

Результаты RATE'93 показали высокое качество РТ-реконструкций и совпадение результатов томографических и радарных сечений в рамках точностей обоих методов [8]. В качестве примера на рис. 10 и 11 представлены сечения ионосферы по данным радара (рис. 10, а; 11, а) и РТ-измерениям с использованием фазоразностного метода (рис. 10, б; 11, б). Как видно из рисунка, РТ-реконструкция хорошо согласуется с

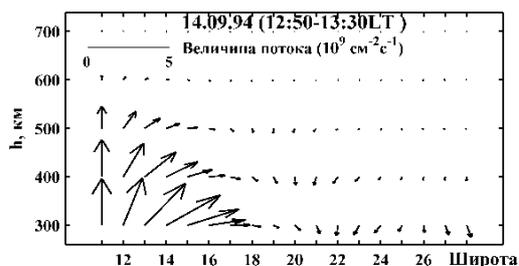


Рис. 9. Пример реконструкции двумерного потока ионосферной плазмы, иллюстрирующий фонтан-эффект.

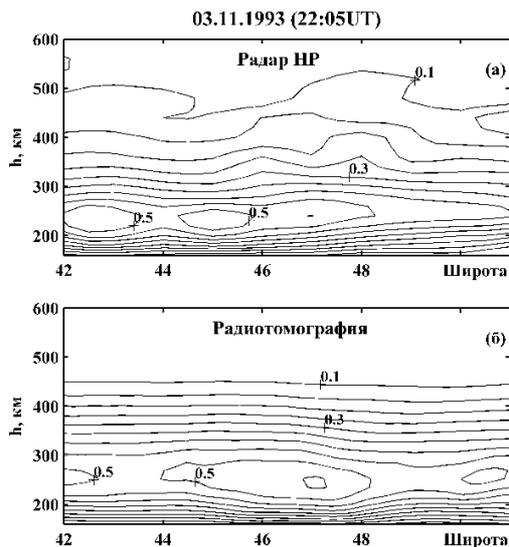


Рис. 10. Сечения ионосферы (северо-восток США) до начала магнитной бури (03.11.1993 г., 22:05 UT) по данным радара (а) и фазоразностной РТ (б).

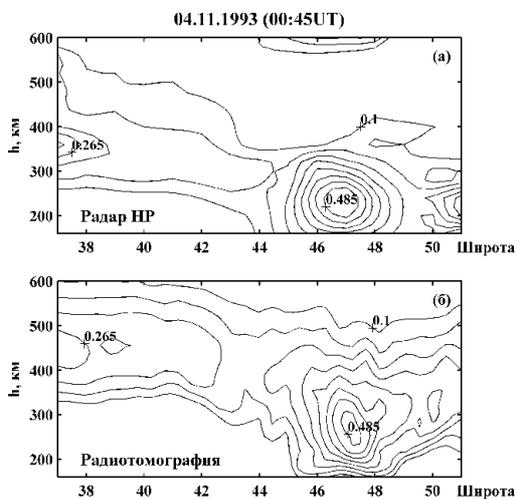


Рис. 11. Сечения ионосферы (северо-восток США) после внезапного начала магнитной бури 04.11.1993 г., 00:45 UT по данным радара (а) и фазоразностной РТ (б).

результатами наблюдений радара. РТ-сечения 4 ноября представляют собой довольно сложную и необычную структуру, в которой присутствует характерный провал в районе 44° и пятно повышенной ионизации на высотах между 200 и 300 км около широты 47°. На левом крае ясно виден подъем F-области ионосферы южнее широты 45°. Такая необычная структура ионосферы обусловлена высыпанием низкоэнергетических частиц в секторе широт между 46 и 51° N [8].

Неоднократно проводились сопоставления РТ-сечений с данными ионозондов по профилям и критическим частотам. В большинстве случаев результаты сравнения показали хорошее совпадение в пределах точностей обоих методов [3, 4, 6, 11]. Один из примеров такого сравнения для одной из первых реконструкций главного ионосферного провала приведен на рис. 12, где отдельными точками изображен высотный профиль электронной концентрации по данным ионосферной станции в Москве, сплошной линией показан профиль, вычисленный по РТ-реконструкции для 07.04.1990 в 22:05 LT (см. рис. 1). Необходимо отметить, что во время гелиогеофизических возмущений работа ионозондов часто нестабильна из-за сильного поглощения радиоволн. В качестве иллюстрации на рис. 13 представлены значения  $f_0F_2$ , вычисленные по РТ-реконструкциям по данным с трассы Кордова–Гакон–Делта на Аляске и измерениям ионозонда в Гаконе в период геомагнитной бури в октябре 2003 г. В отличие от ионозондов, использующих КВ-радиоволны, РТ-методы позволяют исследовать структуру ионосферы и в периоды сильных гелиогеофизических возмущений, поскольку в задачах РТ из-за высокой частоты зондирования (150 МГц) поглощением, как правило, можно пренебречь.

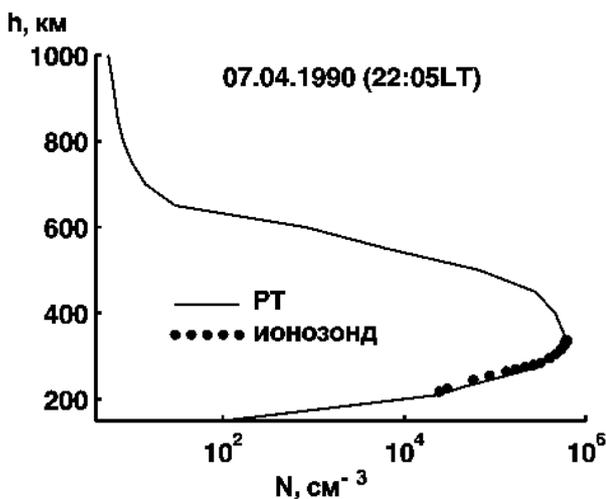


Рис. 12. Профили электронной концентрации для 07.04.1990 г. (22:05 LT), вычисленные по РТ-реконструкции и данным ионозонда в Москве.

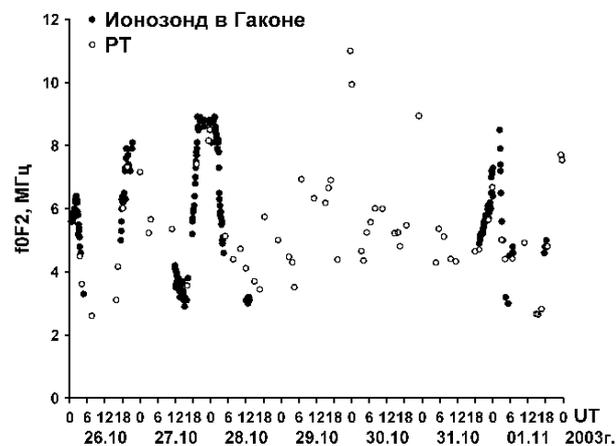


Рис. 13. Сравнение значений  $f_0F_2$ , вычисленных по РТ-реконструкциям и по данным ионозонда в Гаконе с 26 октября по 1 ноября 2003 г.

### Заключение

В настоящее время существует около десятка действующих сетей (линеек) приемников на базе НО спутниковых навигационных систем в различных регионах мира (России, Великобритании, Скандинавии, на Финляндии, Гренландии, Карибском бассейне, на Аляске), которые активно используются для исследовательских целей. Начаты работы по созданию РТ-цепочки в Индии, планируется продолжение работ в Юго-Восточной Азии с запуском специализированных спутников. К настоящему времени получено много новой геофизической информации. Были исследованы как интересные формы хорошо известных структур (провал, перемещающиеся ионосферные возмущения, ЭА и т. д.), так и малоизвестные структуры («пальцеобразные» структуры, наклонный провал и др.). Часть РТ-результатов невозможно получить другими методами. Например, узкий наклонный провал не виден ионозондом, «пальцеобразные» неоднородности на больших высотах не выделяются методом некогерентного рассеяния и т. д. Если измерения проводить на нескольких приемных цепочках, расположенных на расстояниях порядка нескольких сотен километров друг от друга, можно исследовать трехмерную структуру ионосферы. Основным существенным ограничением метода НО РТ является необходимость создания систем со многими линейками приемников. Принципиальное отличие НО РТ-системы от традиционных средств ионосферной диагностики состоит в том, что это распределенная система: перемещающиеся ИСЗ и сеть приемников дают возможность непрерывно зондировать среду по всем возможным направлениям и восстанавливать пространственную структуру ионосферы. В настоящее время созданы томографические системы регионального мониторинга ионосферы в ряде стран. Подобные НО РТ-системы приемников могут стать основой сети глобального мониторинга ионосферы.

Работа проведена при поддержке РФФИ (грант 04-05-64671).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. и др. Томографическая реконструкция провала ионизации околоземной плазмы // Письма в ЖЭТФ. 1990. Т. 52. С. 145–148.
2. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991. 176 с.
3. Kunitsyn V.E., Tereschenko E.D. Ionospheric Tomography. Springer-Verlag. 2003. 259 p.

4. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Наука, 2006. 330 с.
5. Leitinger R. Ionospheric tomography // Rev. Radio Sci. 1999. P. 581–623.
6. Pryse S.E. Radio tomography: a new experimental technique // Surveys in Geophysics. 2003. V. 24. P. 1–38.
7. Nygrén T., Markkanen M., Lehtinen, et al. Stochastic inversion in ionospheric radiotomography // Radio Sci. 1997. V. 32. P. 2359–2372.
8. Foster J.C., Kunitsyn V.E., Tereschenko E.D. et al. Russian-American tomography experiment // Int. J. Imaging Syst. Technol. 1994. V. 5. P. 148–159.
9. Андреева Е.С., Franke J.S., Yeh K.C., Kunitsyn V.E. Some features of the equatorial anomaly revealed by ionospheric tomography // Geophys. Res. Lett. 2000. V. 27(16), P. 2465–2468.
10. Yeh K.C., Franke S.J., Андреева Е.С., Kunitsyn V.E. An investigation of motions of the equatorial anomaly // Geophys. Res. Lett. 2001. V. 28(24). P. 4517–4520.
11. Franke S.J., Yeh K.C., Андреева Е.С., Kunitsyn V.E. Study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images // Radio Sci. 2003. V. 38(1). P. 11\_1–11\_12.
12. Ораевский В.Н., Куницын В.Е., Ружин Ю.Я. и др. Радиотомографические сечения субавроральной ионосферы нв трассе Москва–Архангельск // Геомагнетизм и аэронавигация. 1995. Т. 35. С. 117–122.
13. Cook J.A., Close S. An investigation of TID evolution observed in MACE'93 data // Ann. Geophys. 1995. V. 13. P. 1320–1324.
14. Андреева Е.С., Franke J.S., Kunitsyn V.E., et al. On generation of an assembly of images in ionospheric tomography // Radio Sci. 2001. V. 36(2). P. 299–309.
15. Kunitsyn V.E., Андреева Е.С., Franke S.J., Yeh K.C. Tomographic investigations of temporal variations of the ionospheric electron density and the implied fluxes // Geophys. Res. Lett. 2003. V. 30(16). P. 1851, doi:1029/2003G016908.
16. Андреева Е.С., Гохберг М.Б., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. и др. Радиотомографическая регистрация возмущений ионосферы от наземных взрывов // Космические исследования. 2001. Т. 39, № 1. С. 13–17.