

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОКОЛОЗЕМНОЙ СРЕДЕ

В.Е. Куницын

REMOTE SOUNDING OF PHYSICAL PROCESSES IN THE NEAR-EARTH SPACE

V.E. Kunitsyn

Обсуждаются методы дистанционного зондирования околоземной среды. Рассмотрены возможности постановки томографических задач с использованием данных современных навигационных систем типа GPS/ГЛОНАСС. Приведены примеры томографических реконструкций электронной плотности в различных регионах и сопоставления с результатами, полученными с помощью ионозондов и низкоорбитальной радиотомографии ионосферы. Рассмотрены возможности, ограничения и перспективы радиотомографии с применением высокоорбитальных навигационных систем. Обсуждаются возможности применения карт полного электронного содержания (TEC), полученных по данным GPS/ГЛОНАСС.

Введение

Исследование структуры ионосферы важно как для понимания физики протекающих в ней процессов, так и для разнообразных радиофизических задач, связанных с распространением радиоволн, поскольку ионосфера существенным образом влияет на работу различных систем навигации, локации и связи. Главную роль среди методов зондирования в связи с изменчивостью ионосферы играют методы дистанционного зондирования, позволяющие получать информацию в реальном времени. Особое место среди них занимают методы радиозондирования, имеющие развитую техническую базу, хорошо разработанные методики измерений и давшие за свою более чем восьмидесятилетнюю историю основную долю информации о строении ионосферы. Методы, основанные на дистанционном зондировании с помощью электромагнитных волн, позволяют получать распределения показателя преломления среды распространения. Показатель преломления, в свою очередь, содержит информацию о распределении физических параметров среды распространения. Показатель преломления ионосферы зависит от распределения электронной плотности и эффективной частоты соударений (плотности нейтралов и плазмы). Показатель преломления атмосферы включает давление, температуру и влажность воздуха. Возможны два основных варианта дистанционного зондирования: регистрация поля, рассеянного почти назад, или поля, прошедшего через среду. В последнем случае работает формализм показателя преломления, и мы имеем дело с когерентным рассеянием. В первом случае возможно наблюдение некогерентного рассеяния на флуктуациях среды, например, на «свободных электронах» в ионосфере. Отметим, что некогерентное поле, рассеянное назад, имеет значительно меньшую интенсивность, чем «когерентное» поле, прошедшее через среду [1]. Поэтому методы некогерентного рассеяния требуют мощных излучающих систем. Однако они позволяют определять ряд дополнительных параметров среды, например, температуры ионов и электронов в случае ионосферы [2, 3]. Просвечивающее зондирование позволяет использовать сравнительно маломощные источники на спутниках. Применение томографических методов – закономерный этап эволюции многих диагностических систем. На современном этапе техника

радиозондирования дает возможность с помощью спутниковых средств проводить зондирование ионосферы в широком диапазоне различных положений приемопередающих систем и применять томографические методы, поэтому в последние годы в ряде стран активно ведутся работы по радиотомографии (РТ) ионосферы.

С начала 90-х гг. интенсивно развиваются методы РТ, позволяющие восстанавливать пространственную структуру распределения электронной концентрации при радиозондировании ионосферы [4–6]. Существующие низкоорбитальные (НО) навигационные системы типа российских спутников «Цикада» и американских «Транзит» (Navy Navigation Satellite System), имеющие практически круговую орбиту на высоте около 1000 км, и наземные цепочки приемников дают возможность получать серии томографических данных по различным лучам. В РТ-экспериментах прием двух когерентных спутниковых сигналов на частотах 150 и 400 МГц и регистрация разности фаз между ними осуществляется на сети из нескольких наземных приемных станций, расположенных вдоль траектории спутников и на расстояниях порядка сотен километров. Такие системы позволяют получать двумерные РТ-сечения ионосферы на расстояниях в 1–3 тыс. километров за времена порядка 5–15 мин. Методы низкоорбитальной РТ (НОРТ), основанные на применении НО систем, изложены в [4–7].

Для реализации метода НОРТ необходимо создание сетей (линеек) приемников. В настоящее время существует около десятка таких сетей, которые активно используются для исследовательских целей. С другой стороны, в последние годы активно развиваются сети приемников высокоорбитальных (ВО) навигационных систем, таких как GPS и ГЛОНАСС. В настоящее время функционирует более тысячи приемников ВО-систем. Здесь рассмотрен вариант РТ ионосферы на ВО-системах (ВОРТ) [8], проведено сопоставление с данными ряда ионозондов, а также с НОРТ.

Радиотомография ионосферы по данным сети ВО-систем (ВОРТ)

С развертыванием глобальных навигационных систем GPS и ГЛОНАСС появился новый инструмент, который позволяет непрерывно проводить

измерения характеристик проходящих через ионосферу радиосигналов. Информация, получаемая сетью приемников GPS, дает возможность постановки задач региональной и глобальной реконструкции распределения электронной плотности в ионосфере. Для РТ ионосферы использование фазовых данных представляется более предпочтительным. Для устранения неизвестного сдвига в фазовых данных (проблема "initial phase") применяются фазоразностные методы, разработанные ранее для НОРТ. Иными словами, в качестве входных данных для задачи РТ используются не значения полного электронного содержания (TEC), а производные по времени $dTEC/dt$ [8].

Сравнительно небольшая угловая скорость движения высокоорбитальных спутников GPS приводит к необходимости учета временной изменчивости ионосферы, т. е. к постановке задачи четырехмерной (4D) томографии (три пространственные координаты и время). Основными особенностями 4D-задачи являются высокая размерность и существенная неполнота 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 для преодоления проблем, связанных с неединственностью решения. Для решения задачи 4D РТ по данным ВО-систем можно использовать подход, разработанный в двумерной спутниковой ионосферной томографии. Обозначим концентрацию электронов через $N(\mathbf{r}, t)$, тогда выражение для TEC будет иметь вид:

$$\int_L N(\mathbf{r}, t) dl = TEC_i,$$

где интеграл вычисляется вдоль i -го луча распространения радиосигнала от спутника к приемнику. Поскольку частота сигнала порядка 1 ГГц, искривлением луча при прохождении им через ионосферу и атмосферу можно пренебречь и считать, что L_i – прямая линия. Таким образом, для решения поставленной задачи требуется найти решение приведенной выше системы линейных интегральных уравнений. Основная идея первого подхода заключается в представлении искомого поля плотности электронов в виде разложения по некоторым локальным базисным функциям (например, B -сплайны степени с нулевой по третьей), т. е.

$$N(\mathbf{r}, t) = \sum_j C_j f_j(\mathbf{r}, t).$$

Записывая интеграл электронной концентрации вдоль луча и, вычисляя производную по времени, получим:

$$\frac{d}{dt} TEC_i = \frac{d}{dt} \int_{L_i} N(\mathbf{r}, t) dl = \sum_j C_j \frac{d}{dt} \int_{L_i} f_j(\mathbf{r}, t) dl.$$

В этом случае набор линейных интегралов или разностей линейных интегралов преобразуется в систему линейных уравнений. Решая эту систему относительно коэффициентов C_j , получим приближение к искомой функции $N(\mathbf{r}, t)$. Для решения сис-

темы применяются как прямые, так и итерационные методы: ART, DART, MART, SIRT и другие [5, 6]. За последние пятнадцать лет в процессе моделирования и валидации различных вариантов НОРТ были найдены лучшие для данных условий (экспериментальных и состояния ионосферы) комбинации методов и алгоритмов. Частично этот богатый опыт НОРТ может быть использован и в случае ВОРТ. Однако, в отличие от двумерной НОРТ здесь необходима дополнительная процедура интерполяции найденных решений в области отсутствия данных. Реализация этого подхода в регионах с густой сетью станций (Северная Америка, Европа) дала хорошие результаты при выборе достаточно грубой сетки и подходящих сплайнов различной гладкости.

Второй подход основывается на идее поиска изначально достаточно гладких решений задачи, таких, чтобы используемые алгоритмы обеспечивали хорошую интерполяцию в области отсутствия данных. Ищется решение, минимизирующее некоторую соболевскую норму, на бесконечном множестве решений исходной (недоопределенной) томографической задачи [8].

Экспериментальные результаты

Приведем примеры реконструкций методом ВОРТ. В частности, по данным на европейской сети GPS-приемников получены 4D-реконструкции ионосферы над Западной Европой в период сильнейшей магнитной бури 28–31 октября 2003 г. в интервале $[-10^\circ; +45^\circ]$ по долготе и $[30^\circ; +80^\circ]$ по широте с часовой дискретизацией по времени. На рис. 1–4 в изолиниях в единицах 10^{16} м^{-2} приведены результаты расчета вертикального TEC ($VTEC$) по данным 4D-реконструкций во время сильных возмущений с 30 октября, 23:00 UT по 31 октября, 02:00 UT 2003 г. Из рисунков видно, что над исследуемым регионом располагалось пятно повышенной ионизации. По данным серии последовательных РТ-реконструкций

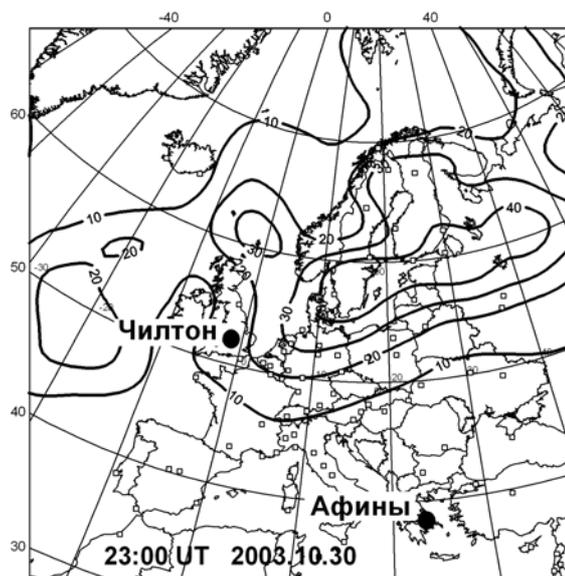


Рис. 1. Изолинии VTEC над европейским регионом в 23:00 UT 30 октября 2003 г.

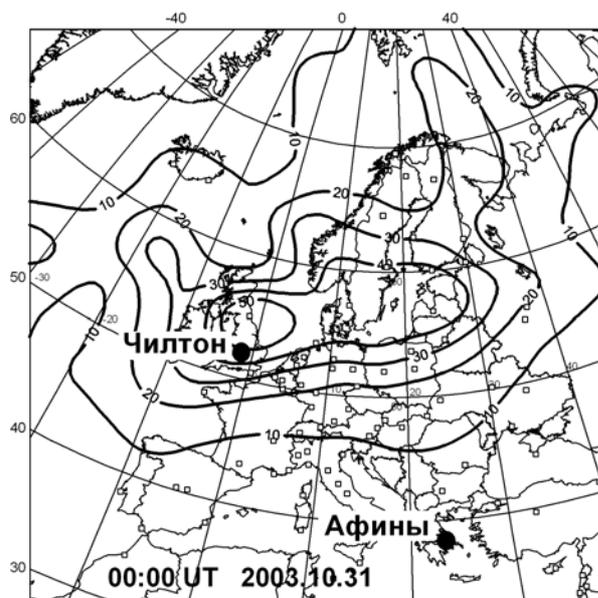


Рис. 2. То же, что на рис. 1, в 00:00 UT 31 октября 2003 г.

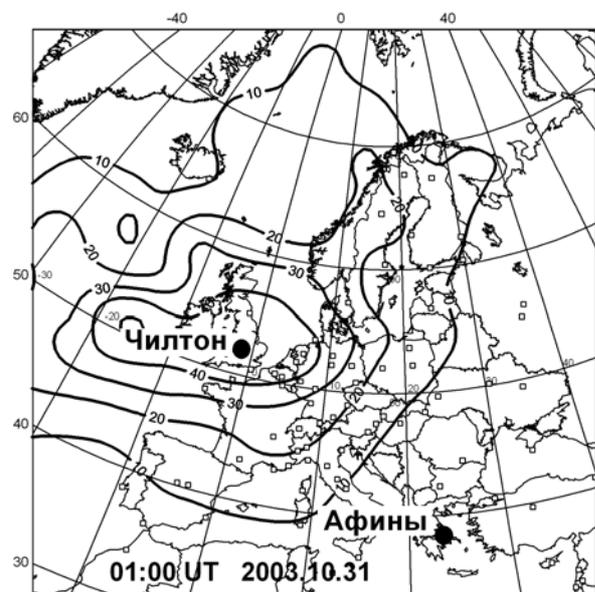


Рис. 3. То же, что на рис. 1, в 01:00 UT 31 октября 2003 г.

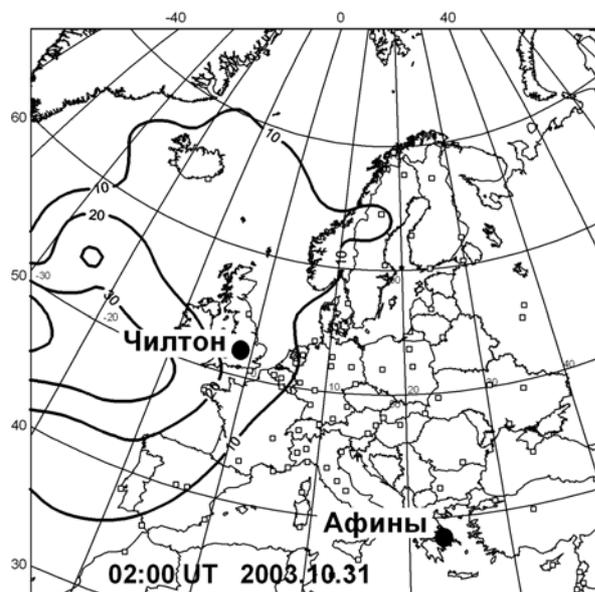


Рис. 4. То же, что на рис. 1, в 02:00 UT 31 октября 2003 г.

прослеживается движение пятна с востока на запад и с севера на юг в вечерние часы 30 октября и ночные часы 31 октября. Конечно, разрешающая способность и качество данных ВОРТ-реконструкций заметно уступает реконструкциям НОРТ, однако основные, существенные для геофизики структуры (провалы, гребни аномалии, крупномасштабные неоднородности электронной плотности) восстанавливаются неплохо [8, 9].

Для периода 28–31 октября 2003 г. было проведено сопоставление данных ряда европейских ионозондов по критическим частотам слоя F2 (f_0F_2) со значениями критических частот, вычисленными по результатам 4D РТ. Расположение двух ионозондов (в Чилтоне и Афинах) показано на рис. 1–4. На рис. 5 приведены графики изменений f_0F_2 30–31 октября 2003 г. по данным 4D РТ-реконструкций и ионозондовых измерений в Афинах. Видно, что ход обеих кривых практически идентичен. На рис. 6 показан график изменений f_0F_2 30–31 октября по данным ионозонда в Чилтоне. Видно, что вблизи полуночи 30/31 октября как по данным ионозонда, так и по РТ-данным было зафиксировано повышение значений критической частоты ионосферы до дневных значений, что соответствует прохождению пятна повышенной ионизации над Великобританией (см. рис. 2 и 3).

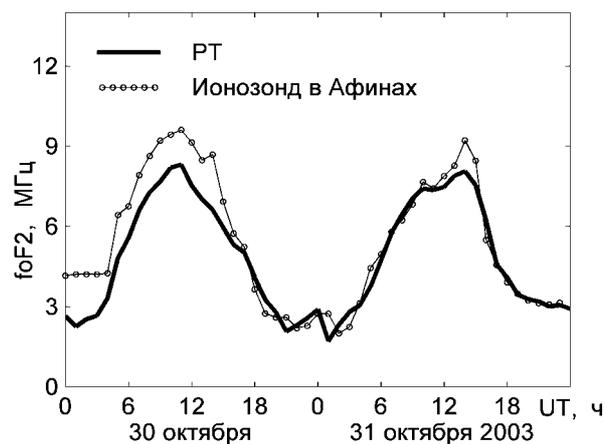


Рис. 5. График изменения f_0F_2 30–31 октября 2003 г. по данным 4D РТ и ионозонда в Афинах.

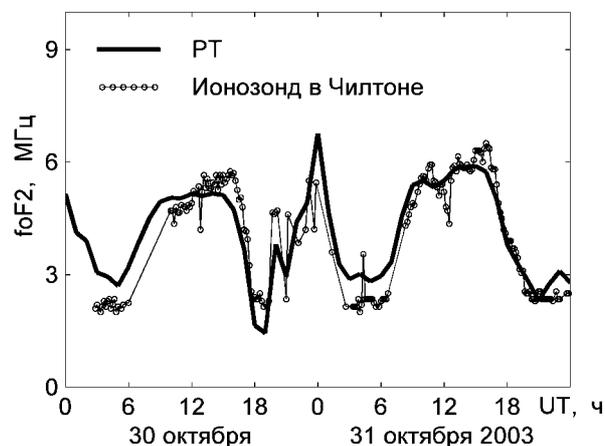


Рис. 6. График изменения f_0F_2 30–31 октября 2003 г. по данным РТ и ионозонда в Чилтоне.

Вертикальные сечения электронной концентрации ионосферы вдоль нулевого меридиана в 00:00 UT и 01:00 UT 31 октября 2003 г. показаны на рис. 7–8. Область повышенной концентрации, расположенная между широтами 50° и 55° N, отражает вертикальную структуру упомянутого пятна [8].

На рис.9 приведен пример ВОРТ реконструкции другой важной ионосферной структуры – экваториальной аномалии. Здесь результаты 4D-реконструкции представлены распределением полного электронного содержания в единицах TECU. На реконструкции хорошо видны северный и южный гребни экваториальной аномалии [8].

На верхних панелях рис. 10, 11 представлены меридиональные НОРТ сечения ионосферы по данным от 21 октября 2002 г., 18:34 UT и 22 октября 2002 г., 12:38 UT в районе Аляски [8]. Координаты приемников: Кордова (60.495° N, -145.47° E), Гаккона (62.399° N, -145.157° E) и Делта (63.902° N, -145.24° E). Экспериментальные РТ-данные доступны на сайте [10]. На нижних панелях рис. 10–11 представлены меридиональные сечения, полученные с помощью ВОРТ. Видно, что квазирегулярная ионосфера (рис. 10) восстанавливается с высокой точностью. Ионосфера с возмущениями восстанавливается существенно хуже, ВОРТ не хватает разрешения и не все существующие максимумы проявляются на реконструкции. Отметим, что на НОРТ-реконструкции возмущения типа АГВ (рис. 11, а) наблюдались за 23 часа до землетрясения с эпицентром 63.514° N, -147.912° E, которое произошло 23.10.2002 г. в 11:27 UT (магнитуда $M = 6.36$, глубина порядка 4.2 км). Данные примеры относятся к магнитоспокойному периоду, когда K_p варьировалось в интервале от 1 до 2 [8]. Было также проведено сопоставление данных ионозонда в Гакконе по критическим частотам слоя F2 (f_0F2) со значениями критических частот, вычисленными по результатам НОРТ и ВОРТ, которое представлено на рис. 12. Как видно из рисунка значения f_0F2 , вычисленные по

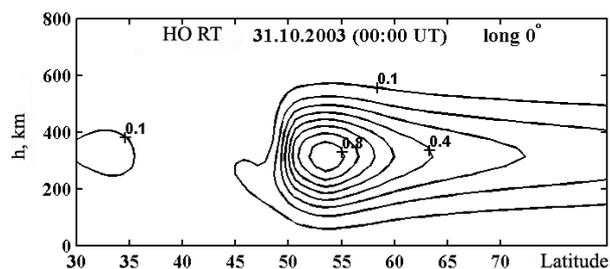


Рис. 7. ВОРТ вертикальное сечение электронной концентрации вдоль нулевого меридиана 31.10.2003 г. в 00:00 UT.

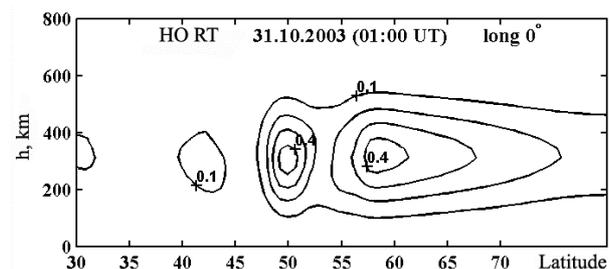


Рис. 8. То же, что на рис. 7, в 01:00 UT.

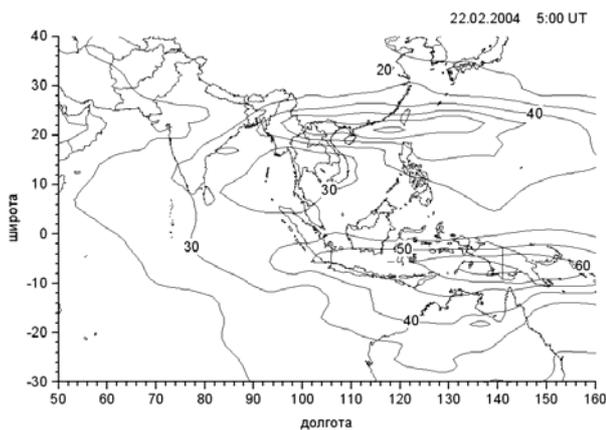


Рис. 9. Реконструкция TEC в области экваториальной аномалии 22.02.2004 г., 05:00 UT по ВО РТ.

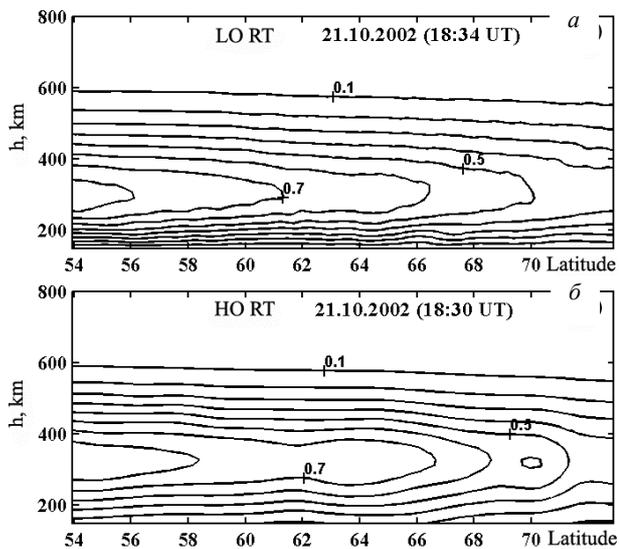


Рис. 10. Меридиональные сечения ионосферы в районе Аляски, полученные с помощью НО РТ по данным от 22.10.2002 г., 18:34 UT (а) и ВО РТ по данным от 22.10.2002 г., 18:30 UT (б).

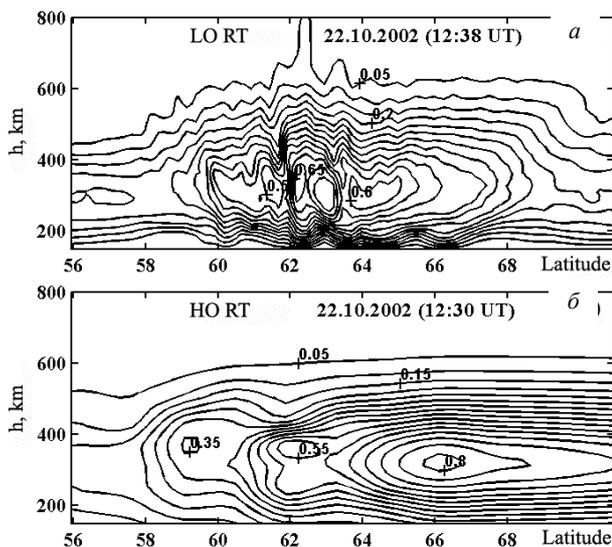


Рис. 11. Меридиональные сечения ионосферы в районе Аляски, полученные с помощью НО РТ по данным от 22.10.2002, 12:38 UT (а) и ВО РТ по данным от 22.10.2002, 12:30 UT (б).

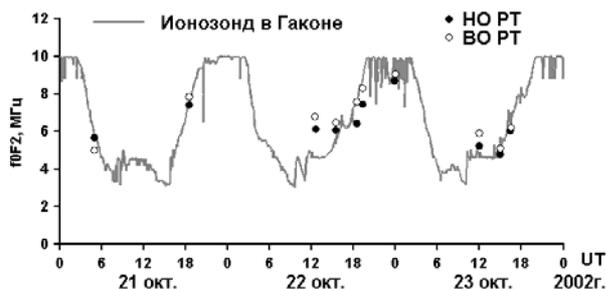


Рис. 12. Изменение значений f_0F_2 21.10.–23.10.2002 г. по данным HO PT, VO PT и ионозонда в Гаконе.

реконструкциям ВОРТ, как правило, несколько завышены, что обусловлено, по-видимому, вкладом плазмосферы.

В последние годы активно используются глобальные ионосферные карты (Global Ionospheric Maps – GIM) полного электронного содержания, сгенерированные на базе данных всемирной сети GPS-приемников [11]. Глобальные TEC -карты вычисляются в нескольких научных центрах: Jet Propulsion Laboratory of California Institute of Technology (JPLG) [12], Geodetic Survey Division of Natural Resources Canada (EMRG) [13], Center for Orbit Determination in Europe, University of Berne, Switzerland (CODG) [14], European Space Agency Group (ESAG), Universitat Politecnica de Catalunya (UPCG) [15] и др. Глобальные ионосферные карты GIM доступны в Интернете [16] в стандартном формате IONEX; файлы содержат данные вертикального TEC ($VTEC$) в диапазоне долгот от 0° до 360° и широт от -90° до 90° . Размер ячейки GIM составляет 5° по долготе и 2.5° по широте. Для каждого момента времени значения $VTEC$ могут получены из IONEX файлов с двухчасовым временным разрешением. Различные методы, применяемые разными научными лабораториями для реконструкции абсолютного $VTEC$, основываются на общей идее подбора параметров выбранной модели вертикального распределения электронной плотности ($N(h)$ -профилей). Такие модельные значения предполагаемой ионосферной поправки к расстоянию до спутника вычисляются для реальных углов зрения до спутника. Затем вычисленные значения поправки сравниваются с измеренными, и этот процесс повторяется для различных параметров $N(h)$ -профиля ионосферной модели до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное расхождение, что соответствует значениям RMS, представленных в IONEX данных. Тогда вычисленный «оптимальный» $N(h)$ -профиль $VTEC$ соответствует среднему значению «вертикального» TEC для соответствующего элемента (ячейки). Ясно, что такое представление структуры ионосферы с помощью параметров $N(h)$ -профилей дает различные решения при выборе разных наборов параметров. Кроме того, в возмущенные периоды в ионосфере и плазмосфере могут присутствовать сильные неоднородности, которые нельзя представить набором небольшого числа параметров $N(h)$ -профилей.

Имеет смысл провести сравнение получающихся глобальных ионосферных карт с результатами

НОРТ и ВОРТ. По данным НОРТ и ВОРТ систем производились 2D- и 3D-реконструкции до высоты 1000 км. При этом для ВОРТ плазмосферный вклад входит в эквивалентную ионосферу. Восстановление структуры плазмосферы в настоящий момент только по данным наземной GPS-сети не представляется возможным, кроме простейших малопараметрических моделей. Точность восстановления структуры ионосферы для НОРТ не хуже 10–15 %, при этом точность определения $VTEC$ около 10 % [4–6]. Результаты НОРТ многократно сопоставлялись с данными ионозондов и радаров некогерентного рассеяния [17, 18], в том числе и в периоды ионосферных бурь. Точность ВОРТ около 20–30 %, для $VTEC$ около 20 %, однако при наличии возмущений с масштабами порядка сотен километров точность ВОРТ-реконструкций может быть хуже. НОРТ хорошо восстанавливает и возмущенные структуры, вплоть до масштабов 20–30 км. На рис. 13–22 приведены типичные примеры сопоставления широтных разрезов в районе Аляски и в России разных глобаль-

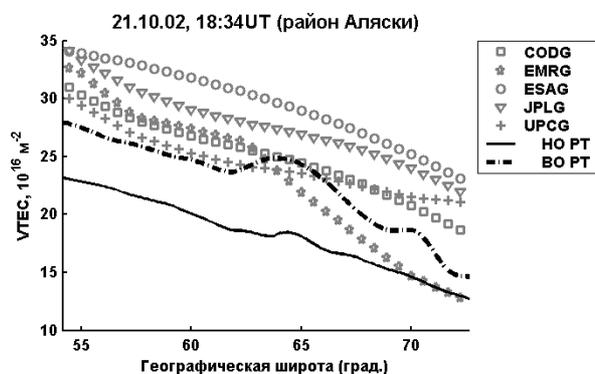


Рис. 13.

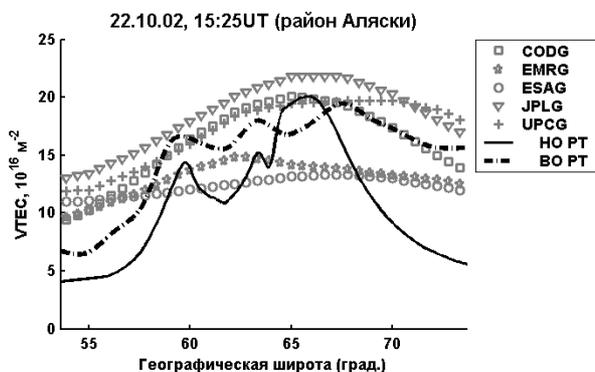


Рис. 14.

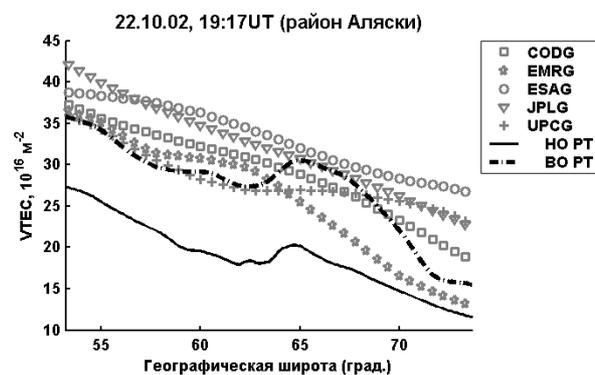


Рис. 15.

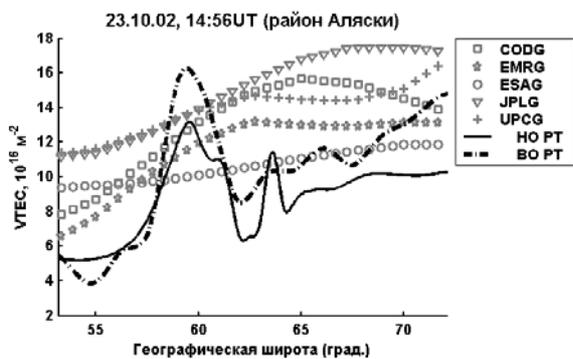


Рис. 16.

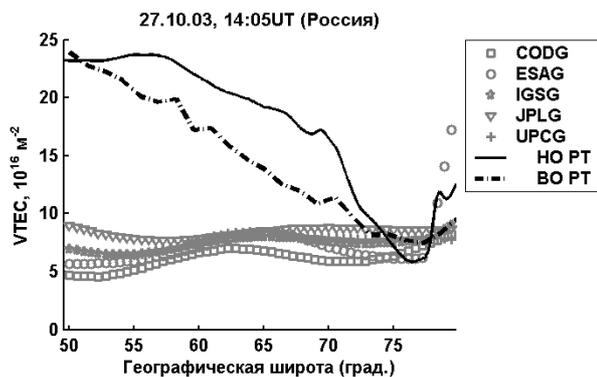


Рис. 20.

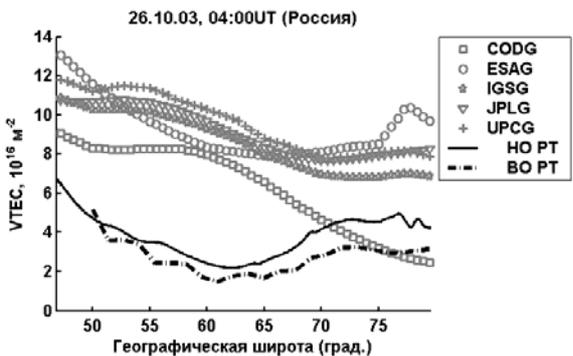


Рис. 17.

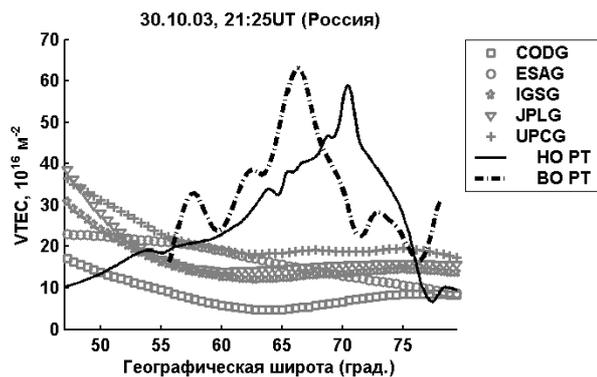


Рис. 21.

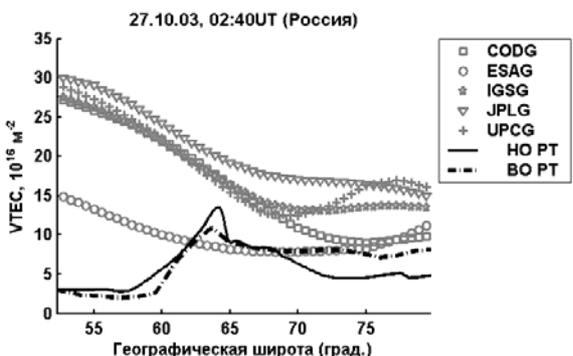


Рис. 18.

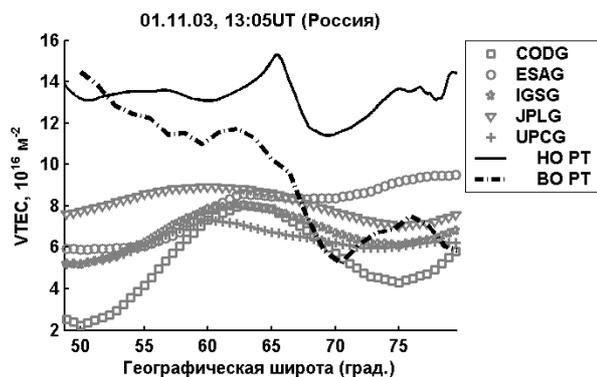


Рис. 22.

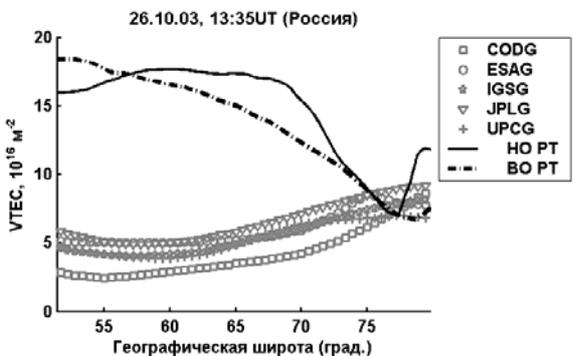


Рис. 19.

ных ионосферных карт GIM с данными ВОРТ и НОРТ. Как правило, результаты НОРТ дают «заниженное» значение, точнее сказать, это весьма точное определение вертикального TEC до высот в 1000 км. Более высокие значения $VTEC$ для разных GIM и ВОРТ можно объяснить вкладом плазмосферы. Примеры таких разрезов даны на рис. 13–18. Видно,

что вклад плазмосферы может быть значительным. Кроме того, видно, что томографические результаты ВОРТ, в основном повторяют (с более низким разрешением) полученные с помощью НОРТ вариации $VTEC$ ионосферы. GIM сильно сглажены и не отражают масштабы порядка нескольких сотен километров. Однако в периоды больших возмущений GIM начинают сильно отличаться от $VTEC$, полученного как НОРТ-, так и ВОРТ-подходом. Примеры таких сопоставлений приведены на рис. 19–22. Здесь в GIM наблюдаются сильно заниженные значения $VTEC$, нередко в 2–5 раз меньше $VTEC$, полученного с помощью НОРТ. Отметим, что рис. 17, 18 также относятся к возмущенному периоду и GIM дают завышенные (до 2–5 раз) результаты по сравнению с НОРТ и ВОРТ.

В настоящее время проведено более сотни сравнений результатов GIM с результатами НОРТ и ВОРТ. В спокойные периоды результаты в основ-

ном совпадают, следует отметить только более высокие значения *VTEC* для GIM и ВОРТ по сравнению с НОРТ, что можно объяснить вкладом плазмосферы. Однако в периоды бурь результаты GIM, как правило, сильно отличаются (в несколько раз) от *VTEC*, полученного как НОРТ-, так и ВОРТ-подходом. Отсюда ясно, что использовать для геофизических выводов данные GIM в возмущенные периоды следует с большой осторожностью.

Заключение

Среди методов диагностики околоземной среды ведущее место занимают методы дистанционного зондирования, позволяющие получать информацию в реальном времени. Особое место среди них занимают методы радиозондирования, давшие основную долю информации о строении ионосферы и ближнего космоса. Применение томографических методов – закономерный этап эволюции почти всех диагностических систем. На современном этапе техника радиозондирования дает возможность с помощью спутниковых средств проводить зондирование ионосферы в широком диапазоне различных положений приемопередающих систем и применять томографические методы. Здесь рассмотрен в основном вариант ВОРТ ионосферы [8] и проведено сопоставление с НОРТ. НОРТ позволяет реконструировать «мгновенные» (5–15 мин) 2D-сечения электронной концентрации. Интервал между реконструкциями зависит от числа действующих спутников и составляет в настоящее время 30–100 мин. ВОРТ позволяет реконструировать 4D-распределения электронной концентрации (3D-реконструкции каждые 20–60 мин). Это дает возможность реконструировать 3D-распределения электронной плотности, восстанавливать структуру крупных неоднородностей. Однако пространственная разрешающая способность ВОРТ заметно ниже, чем в случае НОРТ, так же как и качество реконструкций волновых и квазиволновых структур. НОРТ и ВОРТ хорошо дополняют друг друга для целей мониторинга ионосферы. Комбинация двух систем позволит реализовать эффективный региональный и глобальный 4D-мониторинг ионосферы.

Автор признателен Андреевой Е.С., Нестерову И.А. и Кожарину М.А., в совместных работах с которыми получены представленные выше результаты, а также сотрудникам Полярного геофизического института и Северо-Западной Исследовательской Ассоциации за предоставленные экспериментальные данные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шеффилд Д. Рассеяние электромагнитного излучения в плазме. М.: Атомиздат, 1978.
2. Hunsucker R.D. Radio Techniques for probing the Terrestrial Ionosphere. Springer-Verlag. 1991.
3. [Ссылка на радар ИСЗФ.](#)
4. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Томография ионосферы. М.: Наука, 1991.
5. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. Ionospheric Tomography. Springer-Verlag. 2003.
6. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Наука, 2006.
7. Андреева Е.С. Лучевая радиотомография ионосферы. Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике. Труды IX Конференции молодых ученых «Физические процессы в космосе и околоземной среде». 2006. С. 16–21.
8. Куницын В.Е., Андреева Е.С., Кожарин М.А., Нестеров И.А. Радиотомография ионосферы с применением высокоорбитальных навигационных систем // Вестник МГУ, сер. физ. 2005. № 1, С. 74–84.
9. Куницын В.Е., Кожарин М.А., Нестеров И.А., Козлова М.О. Проявления гелиогеофизических возмущений конца октября 2003 г. в ионосфере над Западной Европой по данным GPS-томографии и ионозондовых измерений // Вестник МГУ, сер. физ. 2004. № 6. С. 12–17.
10. <http://www.harp.alaska.edu/harp/data.fcgi>
11. Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N. et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // Radio Sci. 1998. V. 33, N 3. P. 565–582.
12. <http://www.jpl.nasa.gov/>
13. <http://www.nrcan-mcan.gc.ca/>
14. <http://www.cx.unibe.ch/>
15. <http://www.upc.es/>
16. <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>
17. Foster J. C., Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. et al. Russian-American tomography experiment // Int. J. Imaging Syst. Technol. 1994. V. 5. P. 148–159.
18. Franke S.J., Yeh K.C., Андреева Е.С., Kunitsyn V.E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images // Radio Sci. 2003. V. 38, N 1. P. 11_1–11_12.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, kunitsyn@phys.msu.ru