

Сравнение данных радиотомографии ионосферы на средних широтах с данными ионозонда, затменного зондирования и моделей ионосферы

А.А. Романов, С.В. Трусов, А.В. Новиков, А.А. Романов

*Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский научно-исследовательский институт космического приборостроения» (ФГУП «РНИИ КП»)
111024, Москва, Авиамоторная, 53
E-mail: romulas@rniikp.ru*

В работе представлены результаты сопоставления данных об электронной концентрации в ионосфере дальневосточного региона России, получаемых методом радиотомографии, с данными независимых измерений и моделей ионосферы. Показано, что результаты затменного зондирования ионосферы плохо подходят для верификации вследствие географического рассогласования профилей электронной концентрации, а информация со спутниковых альтиметров не имеет должной точности. Сопоставление результатов определения электронной концентрации методом радиотомографии с данными ионозонда и модельными данными показало хорошее соответствие рассмотренных рядов данных.

Ключевые слова: томография ионосферы, автоматизированная система, информационная технология.

Введение

Изучение состояния ионосферной плазмы необходимо для решения широкого круга задач, связанных не только с распространением радиоволн, но и с обеспечением бесперебойного функционирования навигационных и спутниковых систем [1], диагностированием предвестников землетрясений [2, 3] и даже оценкой влияния космической погоды на состояние здоровья метеозависимых людей [4].

До недавнего времени, исследование ионосферы ограничивались схемами вертикального или наклонного зондирования радиосигналами с Земли [5]. Подобные схемы исследований позволяли исследовать ионосферу исключительно до слоя максимума, восстанавливая, в том числе, пространственную структуру критических частот.

С появлением спутниковых навигационных систем первого поколения [6], методов исключения неизвестной постоянной полных циклов фазы когерентных сигналов, излучаемых низкоорбитальными космическими аппаратами [7, 8], а также восстановления вертикальных профилей и реконструкции вертикальных распределений электронной концентрации [7, 9], появилась возможность исследований всей толщи ионосферы до высот орбиты спутников.

С учетом развития новых подходов и автоматизированных систем регистрации состояния ионосферы [10, 11, 12] появилась необходимость непосредственного сравнения и верификации данных, используя максимальное количество доступных на сегодняшний момент источников информации о состоянии ионосферы.

Непосредственно оценить качество полученной информации в результате автоматизированной томографической реконструкции по данным сигналов низкоорбитальных навигационных и специализированных космических аппаратов можно путем сравнения с данными от других источников информации об ионосфере, таких как спутниковые альтиметры, ионозонды, верти-

кальные профили ионосферы, полученные от космических систем «просветного зондирования» и радары некогерентного рассеяния.

Сравнение данных радиотомографии ионосферы с информацией спутниковой альтиметрии

На первый взгляд наиболее подходящим источником информации об ионосфере Земли является спутниковый альтиметр. Спутниковый альтиметр, излучающий в надир на частоте ~ 13 ГГц активный прибор, который установлен на спутниках JASON-1, JASON-2, ENVISAT и GFO с высотами орбит от 800 до 1300 км. Альтиметр измеряет время между испущенным и принятым сигналом, из которого рассчитывается мгновенная высота фазового центра антенны альтиметра над уровнем океана. Для учета ионосферной задержки сигнала альтиметра используется второй когерентный сигнал на частоте $\sim 5-6$ ГГц.

Однако в силу специфики работы прибора оценить полное электронное содержание в надир спутниковый альтиметр может только над акваторией океана.

С другой стороны, в соответствии с [13] точность ионосферной поправки альтиметра не превышает 2-3 см. Если пересчитать данную величину в термины полной электронной концентрации вдоль луча распространения сигнала получится, что точность определения электронной концентрации спутниковыми альтиметрами не превышает 5 TECU ($1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл.} \cdot \text{м}^{-2}$). На самом деле точность определения полной электронной концентрации спутниковыми альтиметрами может быть и несколько хуже (рис. 1).

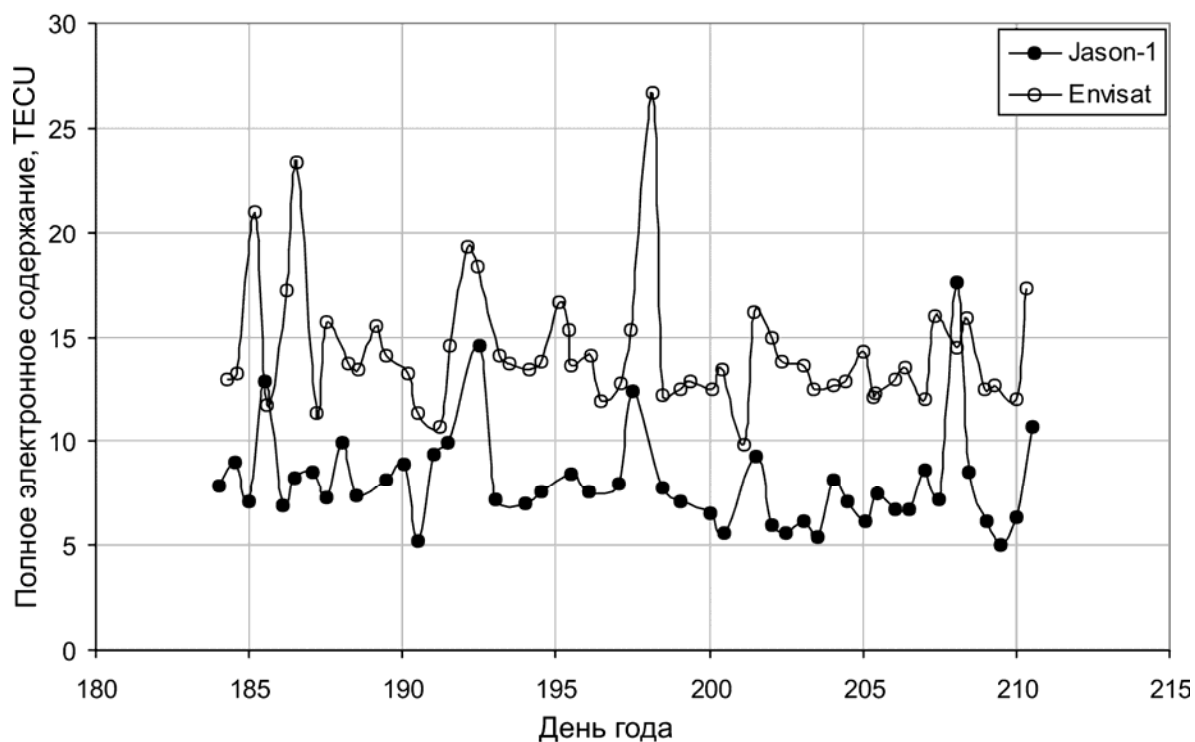


Рис. 1. Временной ход полной электронной концентрации ионосферы в районе залива Терпения, о. Сахалин в июле 2007 г.

Результат анализа информации со спутниковых альтиметров установленных на КА JASON-1 и ENVISAT для одной точки пространства показал, что абсолютная разница измерений двух альтиметров составляет порядка 10 TECU, что делает использование данных альтиметрии не целесообразным для верификации.

Сравнение данных радиотомографии ионосферы и вертикальными профилями, рассчитанными на основе информации систем FORMOSAT3/COSMIC и GPS

В 2006 году была запущена космическая система FORMOSAT-3/COSMIC [9], являющаяся продолжателем космической миссии экспериментального спутника CHAMP, низкоорбитальные КА которой оснащены приборами для регистрации сигналов системы GPS для осуществления затменного зондирования ионосферы и нижней атмосферы.

Было проанализировано более чем 200 профилей электронной концентрации, полученных по данным системы COSMIC.

Наиболее типичные примеры представлены на рисунках 2 и 3. На рисунке 2 представлен профиль электронной концентрации правая панель, полученная из анализа томограммы и данных системы COSMIC 27.07.2007 в 20 часов по Гринвичу. Аналогично на рисунке 3 представлена информация томограммы и профиль электронной концентрации системы COSMIC 14.08.2007 в 12 часов 30 минут по Гринвичу.

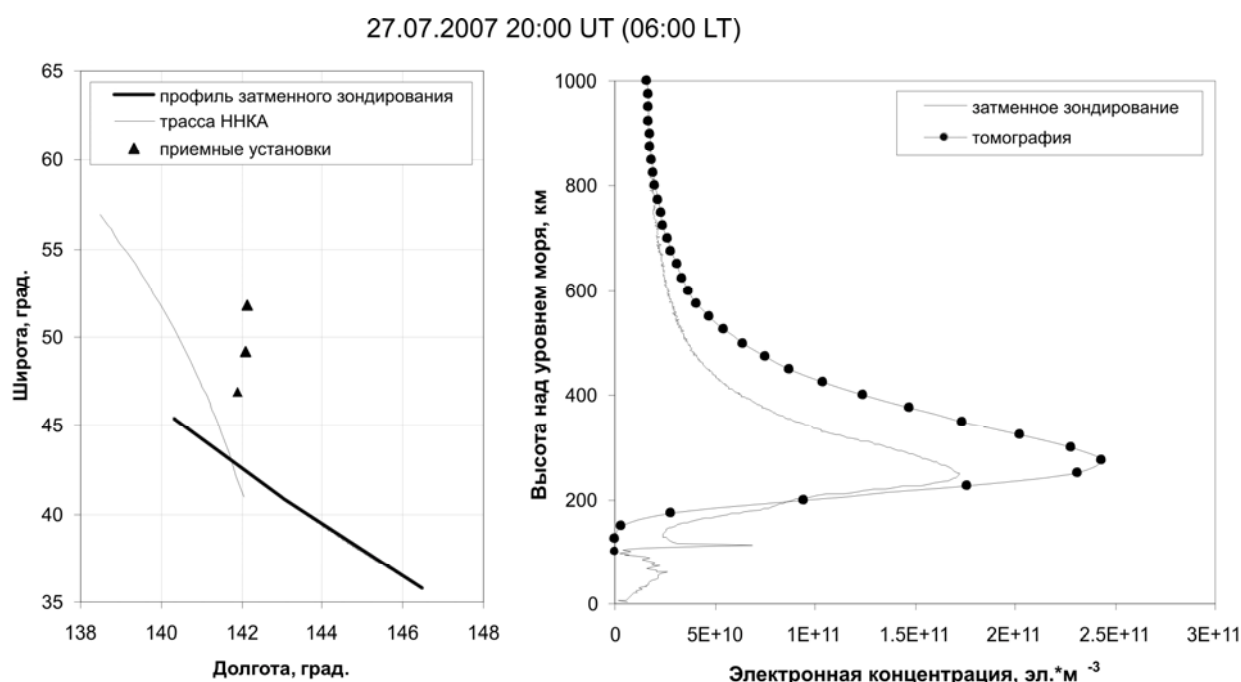


Рис. 2. Профили электронной концентрации по данным томографии и системы COSMIC 27.07.2007

Характер кривых на рисунках показывает, что кривые профилей плохо согласуются друг с другом. Причем на рисунке 2 концентрация максимума по томографии больше, чем на профиле, полученном по данным системы COSMIC, тогда как на рисунке 3 представляет обратную ситуацию.

Наиболее вероятная причина подобного несовпадения профилей, рассчитанных на основе информации томографических реконструкций вертикального распределения электронной концентрации по данным навигационных и специализированных низкоорбитальных систем и системой COSMIC, лежит, по всей видимости, в геометрической конфигурации схемы измерений (рис. 2 и 3, левые панели). Коричневыми точками представлен подспутниковый трек низкоорбитального навигационного аппарата, а синими точками обозначены проекции на поверхность Земли точек профиля системы COSMIC.

Из рисунков следует, что профиль системы COSMIC представляет собой не измерение электронной концентрации в надир, а имеет существенную (~ 800 км) протяженность под некоторым углом к поверхности Земли. Поэтому, не совсем ясно на какой широте из томографической реконструкции следует выбирать вертикальный профиль для сравнения с данными системы COSMIC.

На рисунках 2 и 3 взят профиль, соответствующий широте проекции на Землю точки максимума профиля системы COSMIC. Из рисунка видно, что расстояние между сравниваемыми профилями по поверхности Земли превышает 100-150 км, которые составляют пространственный радиус корреляции в ионосфере. Таким образом, к сожалению, данные системы COSMIC, также не подходят для верификации информации спутниковой томографии ионосферы.

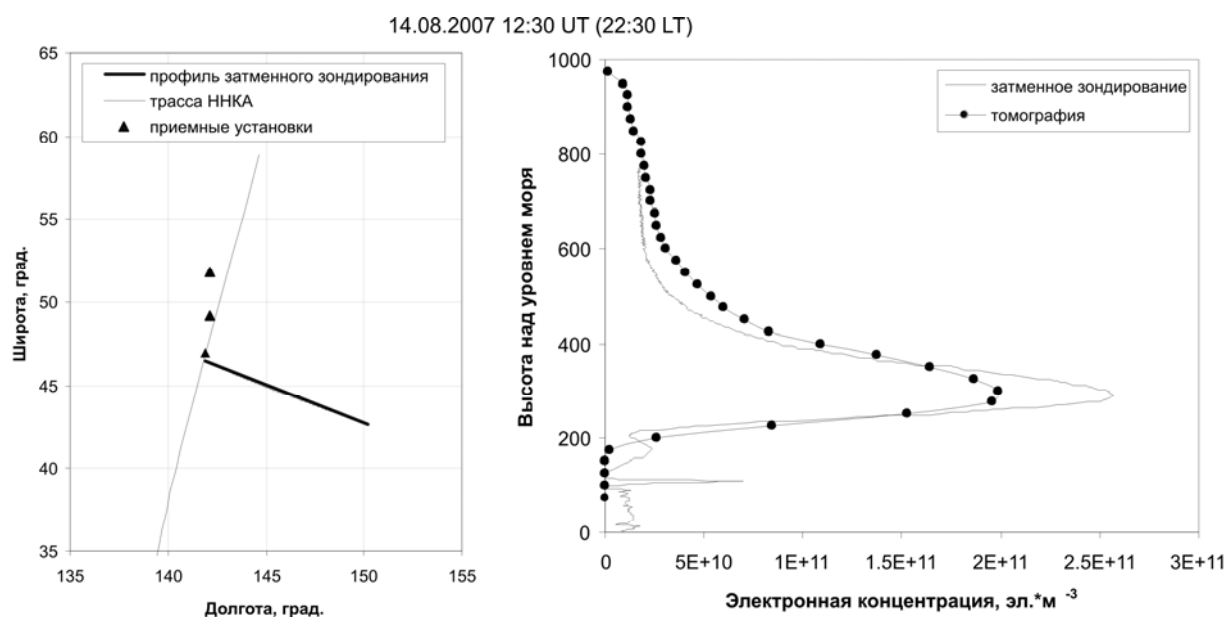


Рис. 3. Профили электронной концентрации по данным томографии и системы COSMIC 14.08.2007

Сравнение данных томографии ионосферы с информацией наземного ионозонда

Следующий этап верификации данных томографии ионосферы связан с анализом данных ионозонда. Необходимо отметить, что ионозонд позволяет оперировать значениями максимума электронной концентрации (значениями критической частоты) и значениями высоты максимума ионосферы.

Для верификации абсолютных значений электронной концентрации, получаемых в процессе реконструкции, были использованы данные ионозонда Вакканай (Wakkanai), расположенного на о. Хоккайдо, в 150 км к югу от наиболее южной приемной установки.

Из полученных реконструкций структуры ионосферы вычислялись максимальные значения электронной концентрации для широты, на которой расположен ионозонд (рис. 4).

Прежде чем приступить к сравнительному анализу информации спутниковой томографии с данными ионозонда, было бы интересно сравнить данные томографии с моделью ионосферы. Наиболее точной моделью ионосферы в настоящее время является модель IRI2007 (International Reference Ionosphere) [14].

На рисунке 5 представлен график сравнения критических частот в ионосфере над г. Вакканай.

В целом видно, что данные, рассчитанные из реконструкций, неплохо совпадают с моделью, однако данные томографических реконструкций несколько меньше по абсолютной величине соответствующих им значений критической частоты, рассчитанной по модельным представлениям.

На рисунке 6 представлен результат сравнения данных ионозонда с данными значений критических частот по модели ионосферы IRI2007.

Данные ионозонда неплохо соответствуют критическим частотам, рассчитанным из IRI2007, что и не удивительно, поскольку модель, в том числе, строится на основе измерений ионозондов по всему миру.

Тем не менее, следует отметить, что дисперсия данных критических частот, рассчитанных на основе томографии, и, измеренных ионозондом, по отношению к модели ионосферы практически одинакова.

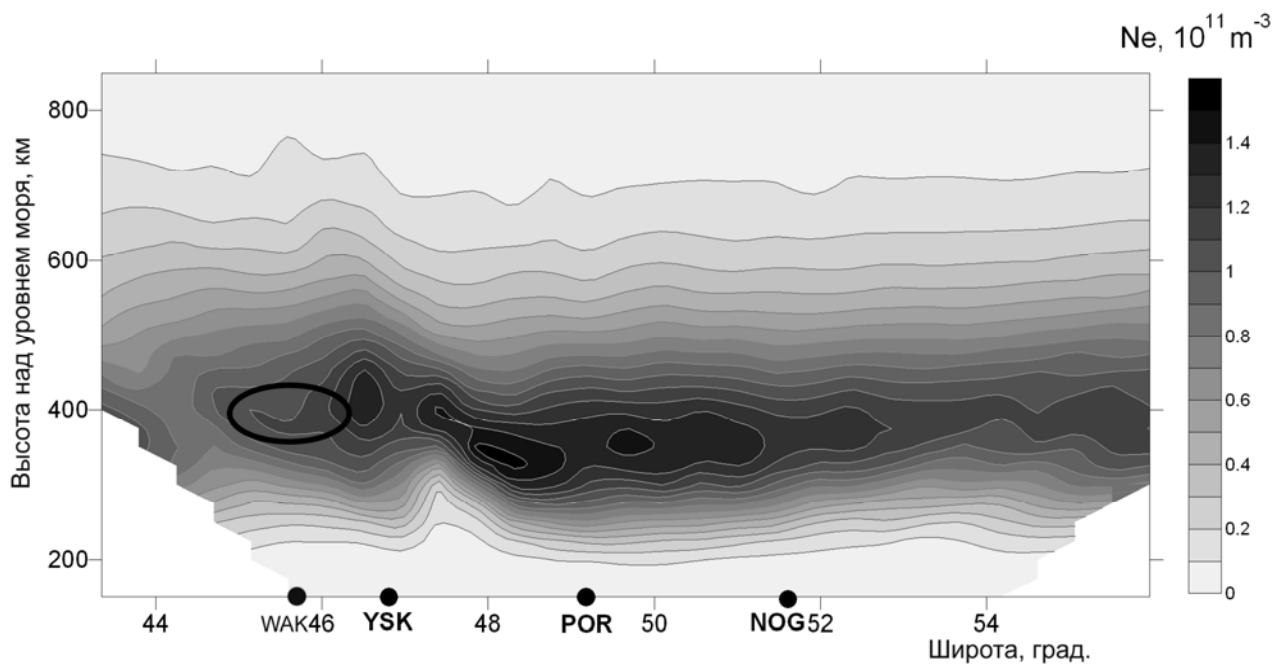


Рис. 4. Расположение области получения данных ионозондом на томограмме, выделено овалом (WAK – ионозонд; YSK, POR, NOG – томографические приемные установки, по оси абсцисс - расстояние вдоль меридиана 142°)

На рис. 7 представлен суточный ход изменения критической частоты над г. Вакканай за период времени с 23 июля по 14 августа 2007 года, где черной кривой отображается суточный ход критической частоты, рассчитанный на основе модели IRI2007, незалитыми значками нанесены значения f_oF2 ионозонда Вакканай, звездочками – значения критической частоты, пересчитанные из измерений ПЭС на станции IGS в г. Южно-Сахалинск и залитыми значками – значения критической частоты, полученные из томографических реконструкции высотных распределений электронной концентрации ионосферы.

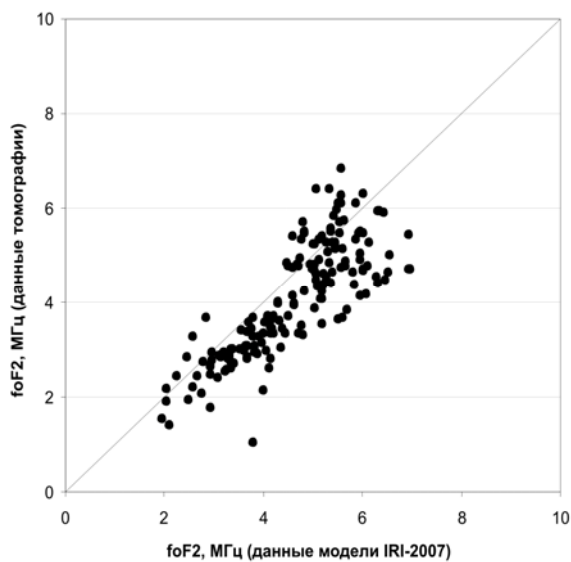


Рис. 5. График сравнения критических частот в МГц, полученных над г. Вакканай по данным модели IRI2007 и томографическим реконструкциям электронной концентрации ионосферы

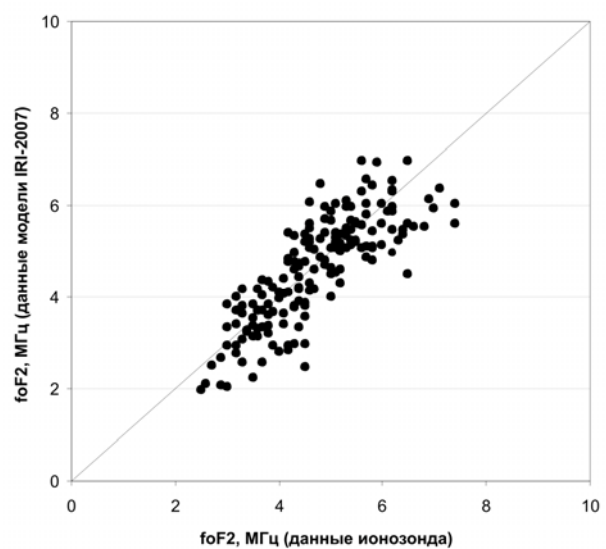


Рис. 6. График сравнения критических частот в МГц, полученных над г. Вакканай по данным модели IRI2007 и ионозонда

В целом, характерная по предыдущему сравнению картина сохраняется. Данные ионозонда лучше соответствуют вариациям кривой критической частоты, рассчитанной по IRI2007. Однако, необходимо отметить, что в дневные часы, данные спутниковой томографии ионосферы не имеют четкого смещения в область более низких частот, тогда как результаты ночных съемок лежат несколько ниже модельной информации.

Измерения, полученные на основе анализа сигналов системы GPS, также неплохо согласуются с моделью IRI2007 и несколько хуже с данными ионозонда и томографии в ночное время. В дневное время, измерения по данным систем ГЛОНАСС/GPS существенно смещены в область более высоких критических частот, что, по-видимому, связано с возросшей ошибкой расчета ПЭС по «кодовым» данным в силу усиливающегося шума сигналов из-за влияния солнечной активности на ионосферу Земли.

Проиллюстрируем картину соответствия данных ионозонда Вакканай и критических частот, рассчитанных из томографических реконструкций, более наглядно (рис. 8). Средняя невязка (среднее разности) составила 15%, $\delta_2 [2] = 0.13$. Коэффициент корреляции между двумя рядами данных $R=0.84$. Т.е. результаты определения $foF2$ двумя различными способами, непосредственными измерениями и решением обратной задачи, хорошо соответствуют друг другу

Из рисунка 8 видно, что значения критической частоты, полученные на основе томографических реконструкций, лежат в области более низких критических частот, чем данные ионозонда. Следует отметить, что сравниваемые данные могут изначально несколько отличаться друг от друга в силу следующих причин. Во-первых, далеко не всегда время сеанса радиопросвечивания совпадает со временем измерения ионозондом, поэтому почасовые данные $foF2$, получаемые ионозондом были предварительно

интерполированы.

Во-вторых, ИСЗ редко проходит над приемными установками точно в зените. В большинстве случаев проекция его орбиты и, соответственно, область просвечивания слоя максимума электронной концентрации в ионосфере, лежит в нескольких десятках или сотнях километров к западу или востоку приемных установок, в то время как ионозонд измеряет значения критической частоты в зените. Не следует забывать также о погрешностях измерения ионозонда, поскольку значения критической частоты и высоты максимума ионосферы могут быть измерены с существенной ошибкой в силу рефракции сигнала ионозонда на неоднородностях слоя максимума.

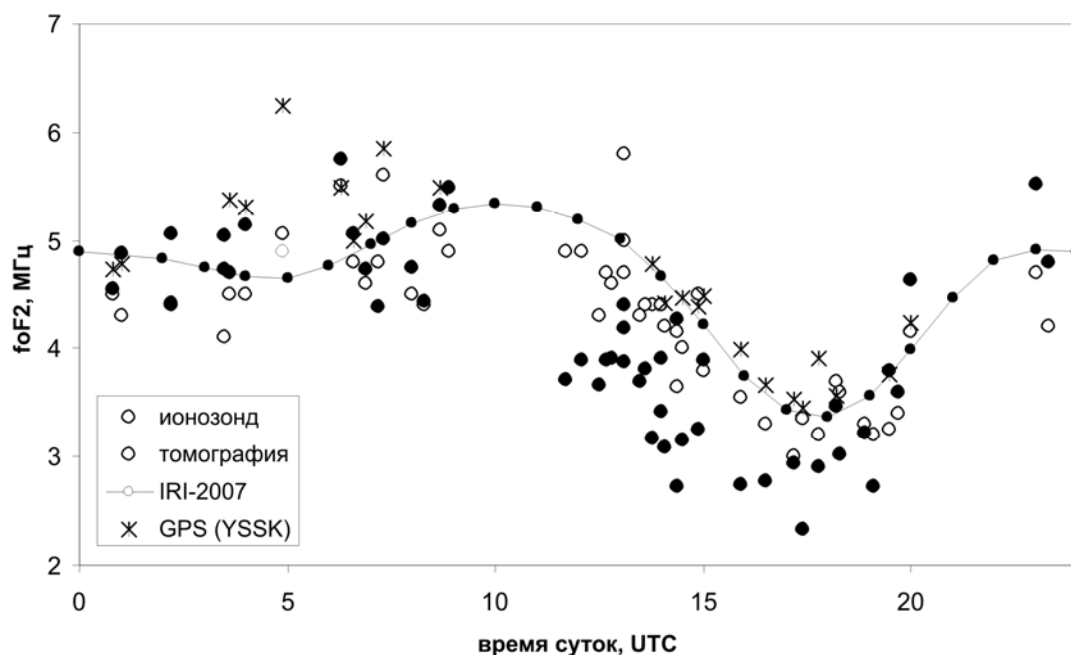


Рис. 7. Суточный ход изменения критической частоты над г. Вакканай в июле 2007 г.

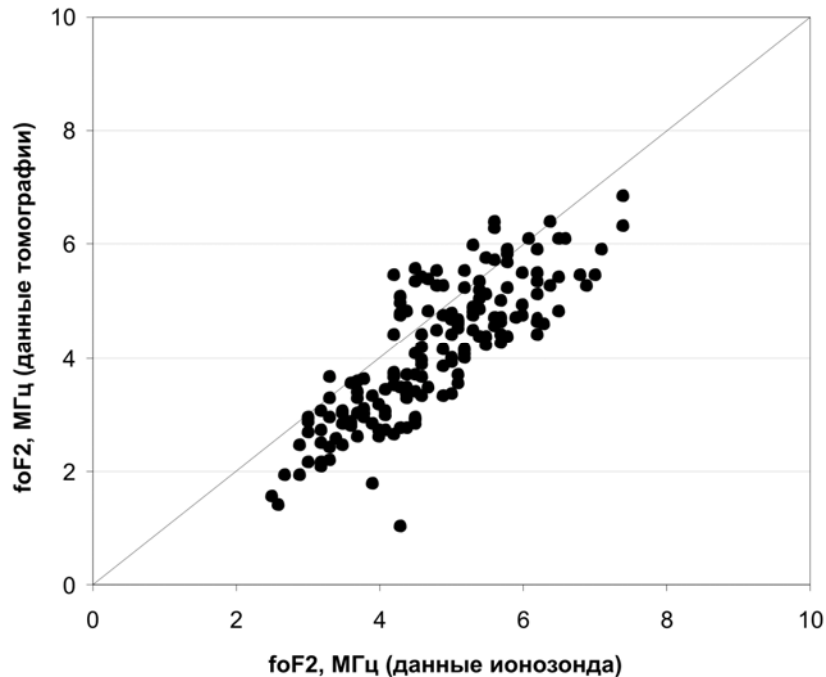


Рис. 8. График сравнения критических частот в МГц, полученных над г. Вакканай по данным ионозонда и томографическим реконструкциям электронной концентрации ионосферы

Выводы

На основании полученных результатов, можно сделать следующие выводы.

В результате анализа информации спутниковой альтиметрии показано, что абсолютная разница измерений двух альтиметров составляет порядка 10 TECU, что делает нецелесообразным ее использование для верификации ионосферных данных.

Поскольку профиль системы COSMIC представляет собой не измерение электронной концентрации в надира, а имеет существенную (~ 800 км) протяженность под некоторым углом к поверхности Земли, возникает неопределенность локализации полученной информации. Поскольку расстояние между томографической реконструкцией электронной концентрации и профилем системы COSMIC по поверхности Земли превышает пространственный радиус корреляции в ионосфере, данные американско-тайваньской системы не подходят для верификации информации спутниковой томографии ионосферы.

Необходимо отметить, что данные ионозонда неплохо соответствуют критическим частотам, рассчитанным из IRI2007, что в целом не удивительно, поскольку модель, в том числе, строится на основе измерений ионозондов по всему миру. Однако, дисперсия данных критических частот, рассчитанных на основе томографии, и, измеренных ионозондом, по отношению к модели ионосферы практически одинакова.

Измерения полной электронной концентрации, полученные на основе анализа сигналов системы GPS, также неплохо согласуются с моделью IRI2007 и несколько хуже с данными ионозонда и томографии в ночное время. В дневное время, измерения по данным систем ГЛОНАСС/GPS существенно смещены в область более высоких критических частот.

Средняя невязка критических частот, рассчитанных из вертикальных распределений электронной концентрации и информации ионозонда Вакканай, составила 15%, δ_2 [2] = 0.13. Коэффициент корреляции между двумя рядами данных $R=0.84$.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №08-07-12014-офи.

Литература

1. Афраймович Э.Л., Косогоров Е.А., Лесюта О.С., Ушаков И.И. Спектр перемещающихся ионосферных возмущений по данным глобальной сети GPS // Известия высших учебных заведений. Радиофизика, 2001. Т. 44. №10. С.828-839.
2. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. Ionospheric Precursors of Earthquakes // Berlin: Springer, 2004.
3. Pulinets S.A., Romanov A.A., Urlichich Yu.M., Romanov A.A., Jr., Doda L.N., Ouzounov D. The First Results of the Pilot Project on Complex Diagnosing Earthquake Precursors on Sakhalin // Geomagnetism and Aeronomy, 2009. V. 49. N1. P.123–132.
4. Кулешова В.П., Пулинец С.А., Сазанова Е.А., Харченко А.М. Биотропные эффекты геомагнитных бурь и их сезонные закономерности // Биофизика, 2001. Т. 46. №5. С.930-934.
5. Мимно Г.Р. Физика ионосферы // Успехи физических наук, 1957. Т. 18. С. 103.
6. Тарасенко М.В. Военные аспекты советской космонавтики. М.: Агентство российской печати; ТОО «Николь», 1992.
7. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
8. Leitinger, R., Schmidt, G., Tauriainen A. An evaluation method combining the differential Doppler measurements from two stations and enables the calculation of the electron content of the ionosphere // Journal of Geophysics, 1975. V. 41, P.201–213.
9. Rocken C., Kuo Y.H., Schreiner W.S., Hunt D., Sokolovskiy S., McCormick C. COSMIC System Description // Special issue of TAO (Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science), 2000. V. 11. N1, P.21-52.
10. Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М. Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным // Космонавтика и ракетостроение, 2006. №1. С.167-172.
11. Романов А.А., Трусов С.В., Романов А.А., Крючков В.Г. Исследование ионосферных неоднородностей методом фазоразностной томографии в дальневосточном регионе России // Исследование Земли из космоса, 2008. №2. С.14-20.
12. Трусов С.В., Романов А.А., Романов А.А., Новиков А.В. Современные подходы к созданию программного комплекса сбора и обработки данных спутникового мониторинга ионосферы и ионосферных предвестников землетрясений // Труды научно-технической конференции “Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий” 19-21 июня 2007 г. М.: Физматлит, 2008. С. 284-290.
13. Benada J. R. Merged GDR (TOPEX/POSEIDON) Generation B. Handbook Version 2// JPL, 2002.
14. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Science, 2001. V. 36 N2. P.261-275.

Validation of the middle latitude ionosphere tomography results on model, ionosonde and occultation data

A.A. Romanov, S.V. Trusov, A.V. Novikov, A.A. Romanov

Russian Institute of Space Device Engineering

The results of the tomography ionosphere electron concentration data in comparison with several independent ionosphere measurements and ionosphere model information are presented. It shown that ionosphere occultation data is not really good as the source for verification, and the satellite altimetry data has not sufficient accuracy. The comparison of the tomography data with ionosonde information has shown good corresponding between two data rows.

Keywords: ionosphere tomography, automated system, information technology.