

УДК 551.510.413.5, 550.837.61, 551.501.8

## ЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ КВ-РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ, СИГНАЛАМИ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

<sup>1</sup>В.Е. Куницын, <sup>1</sup>Е.С. Андреева, <sup>2</sup>В.Л. Фролов, <sup>2</sup>Г.П. Комраков, <sup>1</sup>М.О. Назаренко, <sup>1</sup>А.М. Падохин

### SOUNDING OF THE IONOSPHERE DISTURBED BY HF HEATING WITH NAVIGATIONAL SATELLITES RADIO TRANSMISSIONS

<sup>1</sup>V.E. Kunitsyn, <sup>1</sup>E.S. Andreeva, <sup>2</sup>V.L. Frolov, <sup>2</sup>G.P. Komrakov, <sup>1</sup>M.O. Nazarenko, <sup>1</sup>A.M. Padokhin

В докладе приводятся результаты экспериментальных исследований свойств крупномасштабных возмущений плотности плазмы, создаваемых при нагреве F2-области ионосферы мощными КВ-радиоволнами. Измерения проводились на нагревном стенде «Сура» как в дневные часы, когда интенсивность искусственных возмущений обычно имеет достаточно низкий уровень и специфические особенности своей генерации, так и в ночных условиях. Диагностика неоднородностей осуществлялась с помощью зондирования возмущенной области ионосферы сигналами навигационных ИСЗ системы GPS, а также сигналами низкоорбитальных навигационных систем «Парус»/TRANSIT.

In the report we present experimental results of the studies of large-scale plasma density irregularities generated in the ionosphere F2-region, which was modified by powerful HF radio waves. The considered measurements were carried out at the Sura heating facility under daytime conditions, when plasma perturbations have usually low intensity and some peculiarities of its generation, and under nighttime conditions. Signals of GPS navigation satellites as well as signals of low-orbital navigational satellites Parus/TRANSIT were used for diagnostics of the irregularities.

#### Введение

Многочисленные исследования воздействия мощных КВ-радиоволн на ионосферу [Gurevich, 2007; Frolov, et al., 1997, 2007] показали, что, помимо обычного омического нагрева ионосферной плазмы, вблизи уровня отражения мощной радиоволны развиваются стрикционная параметрическая, тепловая (резонансная) параметрическая и самофокусирующая неустойчивости. Это приводит, в частности, к сильному разогреву в этой резонансной области электронов и генерации искусственных неоднородностей плотности плазмы в диапазоне масштабов от долей метра до десятков километров [Gurevich, 2007]. Эти неоднородности оказывают существенное влияние на свойства распространяющихся через возмущенную область ионосферы радиоволн VHF/UHF/L-диапазонов, что делает возможным зондирование возмущенной области ионосферы сигналами спутниковых навигационных систем, работающих в этих диапазонах [Gurevich, 2007; Milikh et al., 2008; Tereshchenko et al., 2008; Frolov et al., 2010; Kunitsyn et al., 2011]. В данной работе рассматриваются экспериментальные результаты влияния возмущений электронной плотности, вызванных КВ-нагревом ионосферы на стенде «Сура», на сигналы навигационных систем GPS/ГЛОНАСС и «Парус»/TRANSIT.

#### Описание эксперимента

Эксперименты проходили на стенде «Сура» (56.15 N, 46.1 E) во время нескольких нагревных кампаний. Измерения проводились, если критическая частота слоя F2 была больше частоты волны накачки и подионосферная точка одного или нескольких высоко- или низкоорбитальных навигационных спутников пересекала область нагрева. Для увеличения эффективности возбуждения искусственной ионосферной турбулентности за счет эффекта магнитного зенита [Gurevich, 2007; Tereshchenko et al., 2008] луч антенны стенда был наклонен на 12° на юг в плоскости геомагнитного меридиана.

Использовалось циклическое излучение волны накачки О-поляризации в следующих режимах: 30 с –

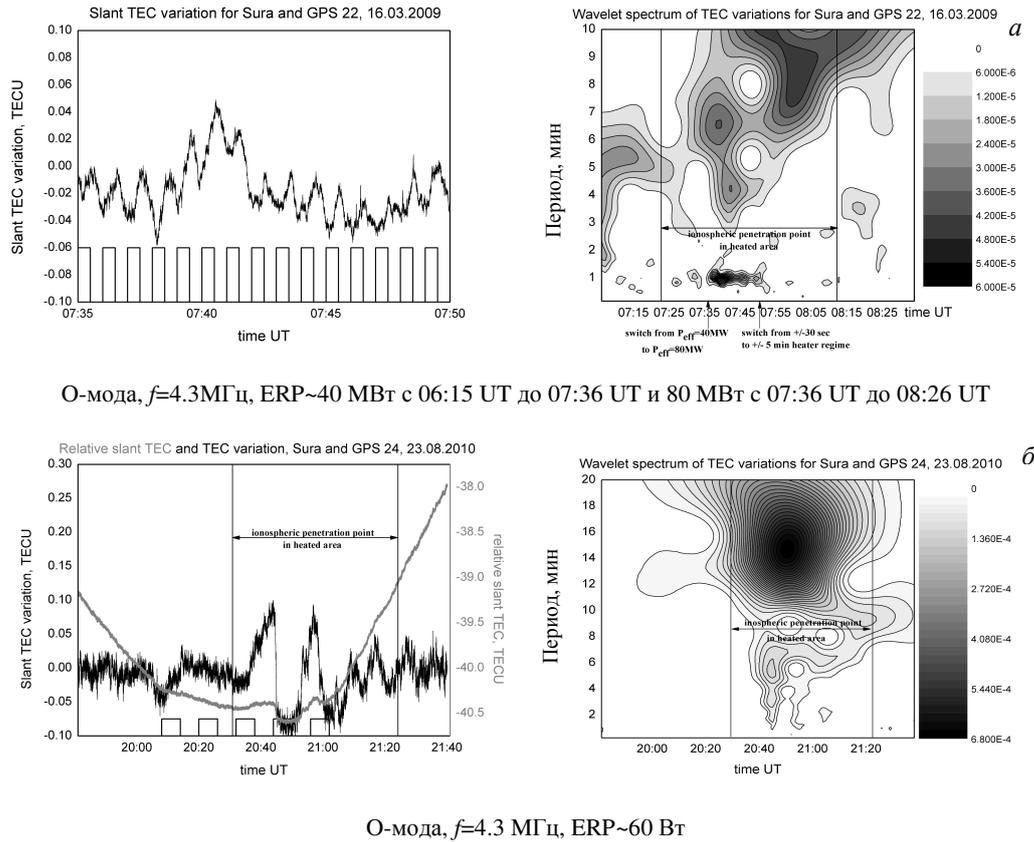
излучение с максимальной мощностью, 30 с – пауза (или [ $\pm 30$  с]); [ $\pm 3$  мин]; [ $\pm 5$  мин]; [ $\pm 6$  мин]; [ $\pm 10$  мин]; [+10 мин, –5 мин]. Ширина диаграммы направленности в случае когерентного излучения всех трех модулей стенда составляет ~12 и ~20° по уровням 0.5 и 0.1 от максимальной мощности, поэтому подионосферные точки медленно движущихся спутников GPS/ГЛОНАСС могут находиться в пределах диаграммы направленности антенны стенда 35–50 мин, что дает возможность получать информацию о временных характеристиках возмущений электронной плотности, вызванных нагревом. В свою очередь, сигналы быстро движущихся низкоорбитальных спутников дают возможность получать практически моментальное высотное-широтное сечение возмущенной области ионосферы.

Для экспериментов в районе стенда «Сура» был специально установлен двухчастотный приемник GPS/ГЛОНАСС. Фазовые измерения на двух несущих частотах использовались для определения относительного наклонного полного электронного содержания (ТЕС) и его вариаций, которые изучались с помощью вейвлет-анализа с целью выявления в них периодичностей и времени их проявления для сопоставления с режимами работы стенда «Сура».

Также использовались данные с трех приемников сигналов низкоорбитальных спутников «Парус»/TRANSIT, специально установленных в районе стенда «Сура» и на ~100 км южнее и севернее стенда, что позволило исследовать пространственную структуру ионосферных неоднородностей, вызванных нагревом, методом низкоорбитальной радиотомографии [Kunitsyn, 2003], а также исследовать мелкомасштабные неоднородности электронной концентрации в возмущенной области по данным о мерцаниях амплитуды сигналов [Tereshchenko et al., 2000a, 2000b].

#### Полученные результаты

На рис. 1 представлены результаты анализа данных приема сигналов GPS, полученных в эксперименте [Kunitsyn et al., 2011; Frolov et al., 2010]. Слева представлены временные зависимости ТЕС и вариации



О-мода,  $f=4.3$  МГц, ERP~40 МВт с 06:15 UT до 07:36 UT и 80 МВт с 07:36 UT до 08:26 UT

О-мода,  $f=4.3$  МГц, ERP~60 Вт

Рис. 1. Вариации TEC (слева) и вейвлет-спектры вариаций TEC (справа) для двух сеансов нагрева, во время которых подионосферные точки спутников GPS пересекали возмущенную область.

ТЕС совместно с режимом работы нагревного стенда, справа – соответствующие вейвлет-спектры вариаций ТЕС для спутников, подионосферные точки которых находились в области нагрева. Результаты, представленные на рис. 1, а, получены в дневных условиях, на рис. 1, б – в ночных условиях.

В сеансе нагрева, результаты которого представлены на рис. 1, а, до 07:36 UT использовался режим  $[\pm 30$  с] с эффективной мощностью 40 МВт. С 07:36 UT эффективная мощность была увеличена до 80 МВт при сохранении того же режима, а с 07:51 UT использовался режим  $[\pm 5$  мин]. Во время этого сеанса подионосферная точка спутника GPS22 пересекала возмущенную область. Вариации с периодом 1 мин, соответствующие модуляции эффективной мощности стенда «Сура», отчетливо видны на записи вариации ТЕС и на вейвлет-спектре. Отметим, что данная периодичность начинает отчетливо выделяться с 07:36 UT, когда стенд был переключен на эффективную мощность 80 МВт, и пропадает в 07:51 UT, когда стенд был переключен на другой режим нагрева. Данные обстоятельства свидетельствуют об искусственном происхождении наблюдаемых вариаций ТЕС. Также можно сделать вывод, что в условиях проведения эксперимента эффективной мощности волны накачки 40 МВт с данной модуляцией оказалось недостаточно для генерации неоднородностей распределения электронной концентрации, детектируемых по данным GPS.

Довольно часто кроме основной периодичности, отвечающей периоду излучения импульсов волны

накачки, в вейвлет-спектре принимаемого сигнала регистрировались не только гармоники, которые могут быть отнесены к гармоникам спектра излучения мощной волны в режиме симметричного меандра, но и интенсивная вторая гармоника основной периодичности, как это видно из рис. 1, б. Наличие второй гармоники может быть объяснено квадратичной зависимостью возмущений температуры электронов от напряженности электрического поля волны накачки [Frolov et al., 2010]. Максимальные вариации ТЕС во время нагревов наблюдались в области магнитного зенита. Отметим также, что вариации ТЕС, вызванные нагревом, были больше в ночных условиях даже при том, что эффективная мощность излучения стенда «Сура» при некоторых ночных экспериментах была ниже, чем при дневных экспериментах.

Приведем также пример зондирования возмущенной области ионосферы сигналами низкоорбитальных спутников типа «Парус»/TRANSIT. На рис. 2 представлены фазовые измерения и соответствующее томографическое сечение ионосферы с провалом ионизации и квазиволновыми структурами в возмущенной области. Приведена также характеризующая мерцания величина дисперсии уровня сигнала на одной из приемных станций. На графике хорошо выражен эффект магнитного зенита (резкое усиление дисперсии уровня сигнала в области геомагнитного зенита приемной станции). Было установлено, что указанный пик дисперсии уровня может отвечать мелкомасштабным флуктуациям электрон-

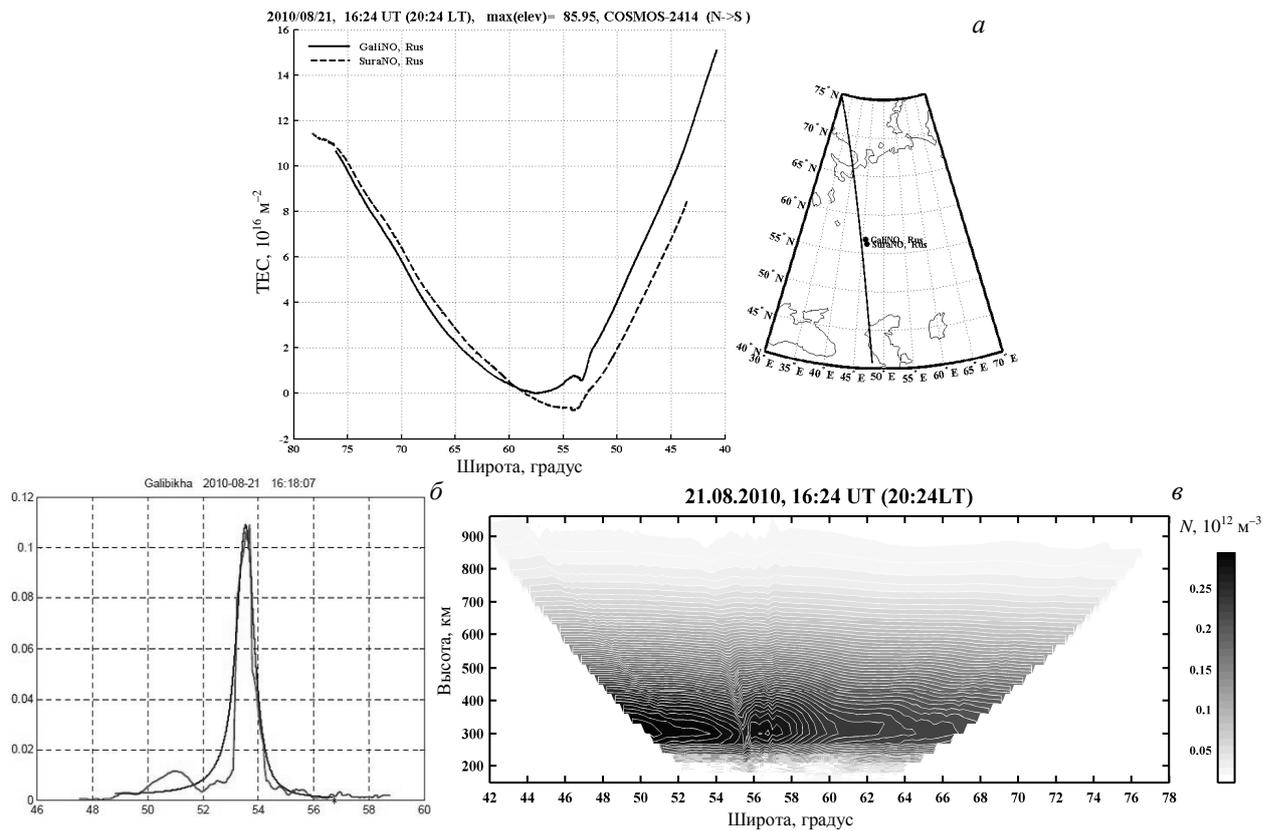


Рис. 2. Записи относительной фазы сигнала спутника COSMOS 2414 со станций Сура и Галибиха во время пролета спутника через возмущенную область (а); дисперсия уровня сигнала (серая линия) на приемной станции Галибиха и ее модельное приближение (черная линия) (б); томографическое сечение возмущенной области ионосферы (в).

ной плотности с соотношением осей вдоль и перпендикулярно направлению магнитного поля 35:7:1. Ось вытянутости неоднородностей в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, образует с направлением на географический север угол порядка 110°.

### Заключение

Данная работа демонстрирует возможности совместного использования GPS/ГЛОНАСС-измерений, двумерной низкоорбитальной радиотомографии и измерений мерцаний навигационных сигналов для исследования эффектов, связанных с КВ-нагревом ионосферы. Фазовые данные GPS/ГЛОНАСС позволяют успешно исследовать временную динамику электронной концентрации в нагретой области, в то же время радиотомографический подход и анализ мерцаний дают информацию о пространственной структуре возмущенной области ионосферы на различных масштабах.

Авторы благодарны сотрудникам стенда «Сура» за их помощь в проведении экспериментов. Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-02-00374, 10-05-01126, 11-05-01157) и Министерства образования и науки РФ (ГК П167, П1072 и 14.740.11.0203).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Frolov V.L., Erukhimov L.M., Metelev S.A., Sergeev E.N. Temporal behaviour of artificial small-scale ionospheric irregularities: review of experimental results // J. Atmos. Solar Terr. Phys. 1997. V. 59, N 18. P. 2317–2333.

Frolov V.L., Bakhmet'eva N.V., Belikovich V.V., et al. Modification of the earth's ionosphere by high-power high-frequency radio waves // Phys. Usp. 2007. V. 50. P. 315–324.

Frolov V.L., Komrakov G.P., Kunitsyn V.E., et al. Sounding of the ionosphere disturbed by the "Sura" heating facility radiation using signals of the GPS satellites // Radiophys. Quant. Electron. 2010. V. 53, N 7. P. 379–400.

Gurevich A.V. Nonlinear effects in the ionosphere // Phys. Usp. 2007. V. 50. P. 1091–1121.

Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. Ionospheric Tomography. New York: Springer-Verlag, 2003. 259 p.

Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E. Study of GNSS-measured ionospheric total electron content variations generated by powerful HF-heating // Adv. Space Res. 2011. V. 47, N 10. P. 1743–1749.

Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J. Perturbations of GPS signals by the ionospheric irregularities generated due to HF-heating at triple of electron gyrofrequency // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. P. L22102.

Tereshchenko E.D., Milichenko A.N., Frolov V.L., Yurik R.Y. Observations of the magnetic-zenith effect using GPS/GLONASS satellite signals // Radiophys. Quant. Electron. 2008. V. 51, N 1. P. 842–846.

Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O., et al. Comparison of the orientation of small-scale electron density irregularities and F region plasma flow direction // Ann. Geophys. 2000a. V. 18. P. 918–926.

Tereshchenko E.D., Kozlova M.O., Evstafiev O.V., et al. Irregular structures of the F layer at high latitudes during ionospheric heating // Ibid. 2000b. V. 18. P. 1197–1209.

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва

<sup>2</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород