

**ИЗМЕРЕНИЕ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ИОНОСФЕРЕ, СТИМУЛИРОВАННОЙ МОЩНЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ, С ПОМОЩЬЮ ДВУХЧАСТОТНОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ СИГНАЛАМИ ГНСС**

<sup>1</sup>Д.А. Когогин, <sup>1</sup>И.А. Насыров, <sup>2</sup>С.М. Грач, <sup>2</sup>А.В. Шиндин

**MEASUREMENT OF TEC VARIATIONS IN THE IONOSPHERE CAUSED BY POWERFUL RADIO EMISSION USING A DUAL FREQUENCY SOUNDING SIGNALS OF GNSS**

<sup>1</sup>D.A. Kogogin, <sup>1</sup>I.A. Nasyrov, <sup>2</sup>S.M. Grach, <sup>2</sup>A.V. Shindin

Представлены результаты измерения полного электронного содержания (ПЭС) в F2-слое ионосферы Земли при воздействии на нее мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура» для экспериментальных сессий, проведенных в период с 2010 по 2013 г. Параллельно с работой мощного передатчика велась регистрация сигналов космических аппаратов спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS, которые в процессе распространения проходили через возмущенную область. Регистрация осуществлялась с помощью приемников геодезического класса, расположенных в пространственно-разнесенных пунктах Зеленодольск (геомаг. коорд.: 55°52' N, 48°33' E), Казань (геомаг. коорд.: 55°48' N, 49°08' E), Васильсурск (геомаг. коорд.: 56°08' N, 46°05' E). Расстояния между измерительными пунктами: Васильсурск–Зеленодольск – ~160 км; Васильсурск–Казань – ~200 км. В ходе эксперимента обнаружены вариации ПЭС для всех трех точек наблюдения. Вариации ПЭС достигают 0.15–0.3 TECU.

Приводятся данные экспериментальных измерений флуктуаций ПЭС в F2-слое ионосферы Земли, возникающих в результате воздействия на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура», проведенных 15 марта 2010 г. и 12 марта 2013 г.

Observations of ionospheric total electron content (TEC) variations caused by powerful radio emission of “SURA” facility were carried out during several experimental companies from March of 2010 to May 2013. Parameters of TEC – variations are obtained by dual – frequency global navigation satellite systems (GNSS) diagnostics. Registration of signal parameters from GNSS – transmitters performed at spatially separated sites along the geomagnetic latitude: Vasilsursk (56°08' N, 46°05' E), Zelenodolsk (55°52' N, 48°33' E) and Kazan (55°48' N, 49°08' E). In the experiments radio path from GNSS satellite to Vasilsursk passed over the disturbed region of ionosphere, but radio paths to Zelenodolsk and to Kazan das not. However correlated with pumping of ionosphere by “Sura” facility TEC – variations were detected for all of three ground measurements sites. Magnitudes of TEC – variations reached 0.15–0.3 TECU.

In this paper the data of experimental measurements of TEC–fluctuations of an ionosphere caused by a powerful shortwave-radio emission of “Sura” facility, conducted in March, 15, 2010 and in March, 12, 2013, are presented.

В течение 2010–2013 гг. было проведено шесть серий измерений ПЭС в ионосфере при воздействии на нее мощным радиоизлучением стенда «Сура». Возмущенная область ионосферы создавалась стендом над районом Васильсурска (56° N, 46° E). Для воздействия на ионосферу во всех сеансах использовалась волна обыкновенной поляризации. Диаграмма направленности антенной системы стенда «Сура» ориентировалась либо в зенит, либо наклонялась на юг на 12° (а в ряде случаев и на 16°) в область «магнитного зенита». Частота воздействия выбиралась исходя из условия  $f_B < f_oF2$ , критическая частота F2-слоя варьировала в пределах от 4.4 до 6.0 МГц. Эффективная излучаемая мощность на выбранных частотах составляла 65÷150 МВт.

На рис. 1 отображено положение возмущенной области ионосферы в предположении, что область плазменных резонансов находится на высоте ~250 км от поверхности Земли. Диаграмма направленности антенной системы нагревного стенда направлена вертикально вверх, ширина главного лепестка составляет 12°. Вектор  $\vec{H}_0$  показывает направление геомагнитного поля в области возмущения ионосферы. Параметры геомагнитного поля были рассчитаны при помощи Мировой модели магнитного поля Земли (WMM-2010). Вертикальными штрихпунктирными линиями показаны радиотрассы «навигационный спутник – ГНСС-радиоприемники» в момент времени, когда спутник находится строго над центром возмущенной области ионосферы.

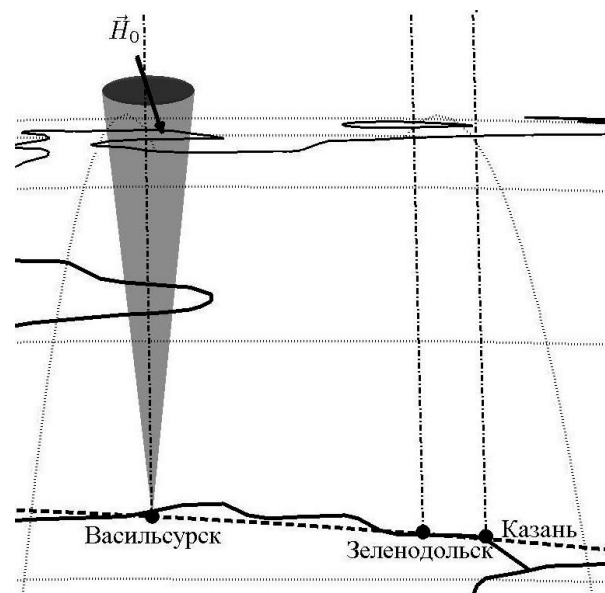


Рис. 1. Постановка эксперимента.

Для расчета полного электронного содержания использовались следующие формулы [Рябов и др., 2011]:

$$I_L = -\frac{1}{K} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (\lambda_1 L_1 - \lambda_2 L_2) + const, \quad (1)$$

где  $K=40.308 \cdot 10^{16} m_e^{-2} / \text{TECU}$ , TECU – общепринятая единица измерения ПЭС,  $1 \text{ TECU}=10^{16} m^{-2}$ ,  $I_L$  – ПЭС, рассчитанное по измерениям фазы сигнала

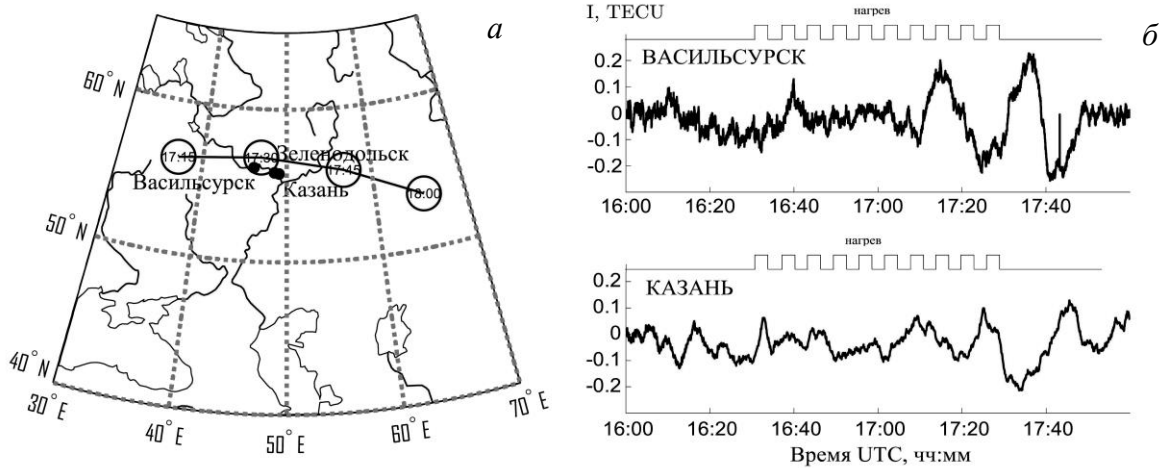


Рис. 2. Расположение пунктов приема сигналов от ГНСС (черные кружки на карте): линия с маркерами времени – трасса и время (UTC) прохождения спутника GPS № 8 15.03.2010 г. (а). Вариации ПЭС на радиотрассах «GPS № 8 – ГНСС-сеть», полученные 15.03.2010 г. во время воздействия мощным радиоизлучением стенда «Сура» на ионосферу (б).

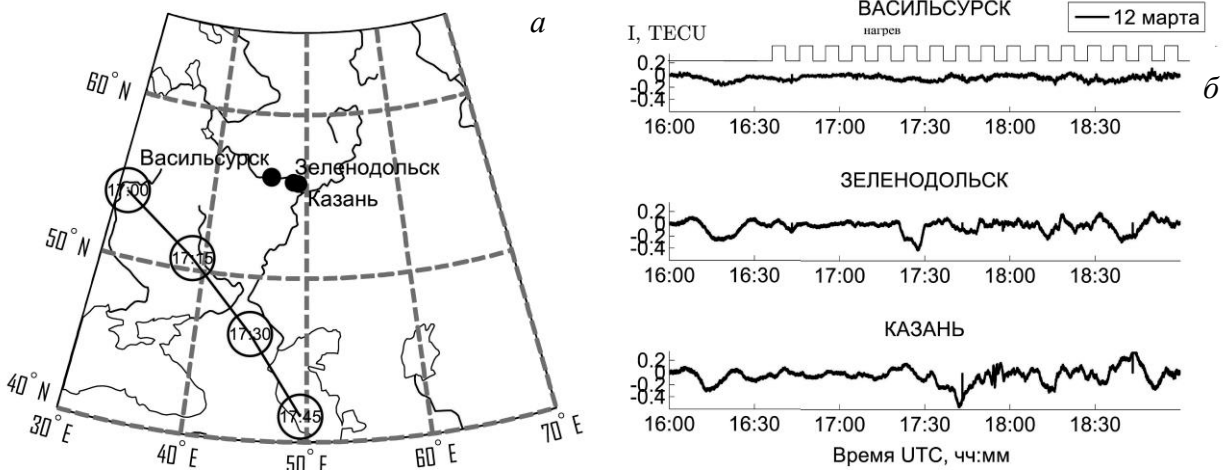


Рис. 3. Расположение пунктов приема сигналов от ГНСС (черные кружки на карте): линия с маркерами времени – трасса и время (UTC) прохождения спутника GPS № 9 12.03.2013 г. (а). Вариации ПЭС на радиотрассах «GPS № 9 – ГНСС-сеть», полученные 12.03.2013 г.: время включения нагрева – 16:39 UTC; время выключения – 19:00 UTC (б).

ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, GALILEO),  $const$  – константа неопределенности, связанная с тем, что фаза принимаемого сигнала никак не синхронизирована с оборудованием на спутнике.

ПЭС может быть также определено через разность псевдодальностей на частотах  $f_1$  и  $f_2$ :

$$I_p = -\frac{1}{K} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (P_2 - P_1) + const. \quad (2)$$

Так как фазовые измерения обладают более высокой точностью, ПЭС на пути следования сигнала определялось с помощью выражения (1), а формула (2) использовалась для нахождения константы неопределенности:

$$const = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_p - I_L), \quad (3)$$

при этом суммирование производится по всем реализациям,  $N$  – общее число отсчетов.

Для детального изучения малых вариаций ПЭС из исходной зависимости  $I(t)$  (полное электронное

содержание от времени) удалялся тренд при помощи вычитания скользящего среднего с линейной весовой функцией:

$$dI(j) = I(j) - \frac{1}{N} \sum_{n=j-N}^{j+N} I[n] \frac{N - |n - j|}{N}, \quad (4)$$

где  $dI$  – колебания ПЭС относительного среднего уровня,  $N$  – параметр усреднения, общее число точек суммирования.

Пятнадцатого марта 2010 г. спутник G08 проходил над стендом «Сура» в вечерние часы (рис. 2, а). Во время пролета спутника через зону диаграммы направленности стенда с 16:30 до 17:30 UTC проводился нагрев ионосферы на частоте  $f_0=4.3$  МГц с эффективной мощностью излучения  $P_0=120$  МВт (работали все три передатчика), диаграмма передающей антенны была направлена вертикально вверх. Режим излучения мощной волны: 2 мин – нагрев, 4 мин – пауза; нагрев ионосферы осуществлялся циклами, согласно режиму. На рис. 2 представлена проекция орбитального движения спутника G08 на поверхность Земли. Время расчета 16:00 UTC – 19:00 UTC.

Двенадцатого марта 2013 г. спутник GPS № 9 двигался с северо-запада на юг таким образом, что радиотрасса «GPS № 9 – Васильсурск» проходила через возмущенную область ионосферы. Режим работы передатчиков – 5 мин нагрев, 2 мин пауза; частота – 4740 кГц; ДН станда «Сура» наклонена на 12° на юг в направлении «магнитного зенита»; время включения нагрева – 16:39 UTC; время выключения – 19:00 UTC.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о проявлении вариаций ПЭС для всех трех пунктов наблюдения (Васильсурск, Зеленодольск, Казань). Так как, согласно современным представлениям [Гуревич, 2007], развитие искусственной ионосферной турбулентности в поле мощной радиоволны происходит вдоль силовых линий геомагнитного поля (вдоль геомагнитной долготы), проявление вариаций ПЭС вдоль геомагнитной широты можно объяснить распространением ионно-звуковой волны, стимулированной мощным радиоизлучением станда «Сура». Сопоставление и сравнение рядов ПЭС для всех трех приемных пунктов позволяет заключить, что скорость распространения искусственных ионосферных неоднородностей составляет ~300 м/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-02-00513-а, 13-02-00957-а и 12-02-31181\_мол\_а).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145.

Рябов А.В., Грач С.М., Шиндин А.В., Котик Д.С. Исследование характеристик крупномасштабных неоднородностей ионосферы, вызванных воздействием на нее мощного коротковолнового радиоизлучения, с помощью сигналов GPS // Известия вузов. Радиофизика. 2011. Т. LIV, № 7. С. 485–496.

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

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