

**ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ
ВДОЛЬ ГЕОМАГНИТНОЙ ШИРОТЫ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ НАГРЕВНОГО СТЕНДА СУРА.
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗА 2014 ГОД**

¹Д.А. Когогин, ¹И.А. Насыров, ²С.М. Грач, ²А.В. Шиндин, ¹Р.В. Загредтинов

**MEASUREMENTS OF TEC VARIATIONS ALONG GEOMAGNETIC LATITUDE DURING
SURA FACILITY RUNS. THE EXPERIMENTAL RESULTS FOR 2014**

¹D.A. Kogogin, ¹I.A. Nasyrov, ²S.M. Grach, ²A.V. Shindin, ¹R.V. Zagretdinov

Представлены результаты измерения полного электронного содержания (ПЭС) вдоль геомагнитной широты с помощью сигналов излучаемых с борта навигационных спутников системы GPS в F2-слое ионосферы Земли при воздействии на нее мощного коротковолнового радиоизлучения стенда СУРА. Регистрация сигналов осуществлялась в трех пространственно-разнесенных пунктах – Зеленодольск, Казань, Васильсурск, расположенных на геомагнитной широте стенда СУРА. Особенностью постановки эксперимента является то, что радиотрасса Васильсурск–Спутник пересекала возмущенную область ионосферы, а радиотрассы Зеленодольск–Спутник и Казань–Спутник нет. Однако в эксперименте наблюдаются вариации, которые коррелируют со временем нагрева ионосферы мощной радиоволной для всех трех пунктов. Относительных размах вариаций ПЭС достигает 0.4 TECU.

Results of measurement of total electron content (TEC) variations along the geomagnetic latitude in the F2 region of the ionosphere caused by powerful radio emission of SURA facility are presented in the report. Parameters of TEC-variations were obtained by dual-frequency global navigation satellite systems (GNSS) diagnostics. Registration of signal parameters from GNSS-transmitters were performed at spatially separated sites along the geomagnetic latitude: Vasilsursk, Zelenodolsk and Kazan. 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 did 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 0.4 TECU.

В 2014 г. с 24 по 29 августа была проведена серия измерений ПЭС ионосферы при воздействии на нее мощным радиоизлучением стенда СУРА. Возмущенная область (ВО) ионосферы создавалась стендом над районом Васильсурска (56° N, 46° E). Для воздействия на ионосферу во всех сеансах использовалась волна обыкновенной поляризации. Диаграмма направленности (ДН) антенной системы стенда была направлена в зенит. Частота воздействия f_0 выбиралась исходя из условия $f_0 < f_oF2$ (f_oF2 – критическая частота F2-слоя) и варьировалась от 4.74 до 5.65 МГц в зависимости от дня проведения эксперимента.

Регистрация сигналов от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) осуществлялась в пространственно-разнесенных пунктах, расположенных вдоль геомагнитной широты: п. Васильсурск (расположен в 500 м. от антенной системы стенда СУРА; использовался ГНСС-приемник «Prego-T»); п. Зеленодольск (расположен – 55°52' N, 48°33' E; использовался ГНСС-приемник Trimble Net R9); п. Казань (расположен – 55°48' N, 49°08' E; использовался ГНСС-приемник Trimble Net R9). Расстояния между измерительными пунктами: Васильсурск–Зеленодольск – ~160 км; Васильсурск–Казань – ~200 км.

На рис. 1 отображено положение возмущенной области ионосферы в предположении, что область плазменных резонансов [Гуревич, 2007] 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. Вся методика обработки данных полученных от ГНСС и изучения малых вариаций ПЭС описана в работе [Рябов, 2011].

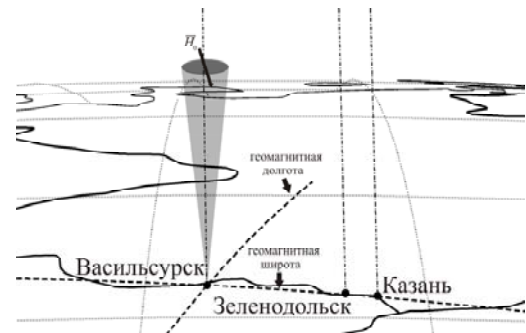


Рис. 1. Схематическое изображение постановки эксперимента по измерению вариаций ПЭС во время воздействия на ионосферу мощным наземным радиоизлучением. Пунктирными линиями на поверхности земли отмечены геомагнитная широта и долгота. Вертикальным штрихпунктирным линиям соответствуют радиотрассы НС–ГНСС-сеть радиоприемников в момент времени, когда спутник находится строго над центром возмущенной области ионосферы.

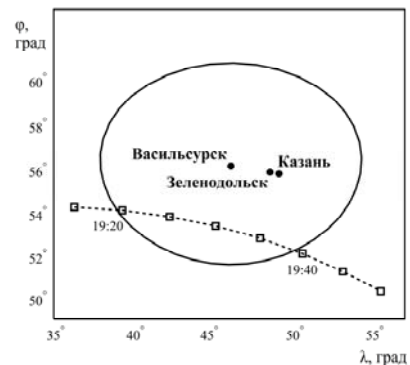


Рис. 2. Расположение пунктов приёма сигналов от ГНСС (отмечены точками на карте); линия с маркерами времени (отмечены квадратами) – трасса и время (UTC) прохождения спутника GPS № 32. (24.08.2014 г.). Местоположение проекции главного лепестка ДН стенда СУРА на высоте пролета спутников GPS (20 200 км) обозначено большим эллипсом.

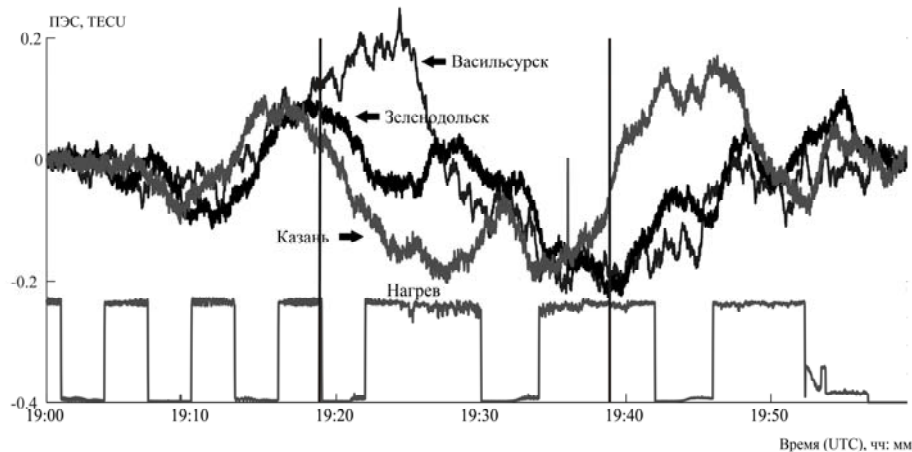


Рис. 3. Вариации ПЭС, зарегистрированные в Васильсурске, Казани и Зеленодольске 24.08.2014 г. для спутника GPS № 32. Режим излучения мощной волны во время пролета спутником ДН стенда – 8 мин нагрев, 4 мин – пауза. Вертикальными сплошными линиями отмечен интервал пролета спутника GPS № 32 над ДН стенда СУРА.

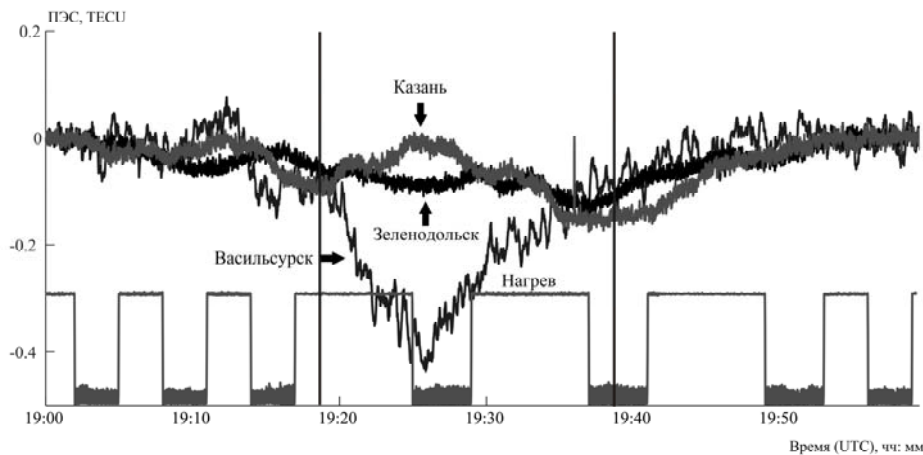


Рис. 4. Вариации ПЭС, зарегистрированные в Васильсурске, Казани и Зеленодольске 26.08.2014 г. для спутника GPS № 32. Режим излучения мощной волны во время пролета спутником ДН стенда – 8 мин нагрев, 4 мин – пауза. Вертикальными сплошными линиями отмечен интервал пролета спутника GPS № 32 над ДН стенда СУРА.

24.08.2014 г. спутник GPS № 32 пересекал ВО в интервале 19:19–19:39 UTC (см. рис. 2); 26.08.2014 г. – в интервале 19:11–19:31 UTC. Режим излучения мощной радиоволны сначала: [3 мин – нагрев, 3 мин – пауза]; затем при подлете спутника к ВО режим менялся на [8 мин – нагрев, 4 мин – пауза], и после пролета опять изменялся на [3 мин – нагрев, 3 мин – пауза]. 24 августа $f_o=4.74$ МГц, $f_oF2=6.497$ МГц; 26 августа $f_o=5.64$ МГц, $f_oF2=7.162$ МГц.

Состояние космической погоды оценивалось с помощью индексов геомагнитной активности (D_{st} и K_p), индекса авроральной электроструи (AE) и планетарного W_p -индекса состояния ионосферной погоды. Все данные были получены на сайтах [<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>; <http://isgi.latmos.ipsl.fr/lesdonne.htm>; <http://www.izmiran.ru/services/iweather/storm>]. Сутки 24 августа 2014 г. были спокойными. Индекс D_{st} равен 6 нТл в начале суток, –5 нТл в середине и 0–1 нТл в поздние часы). В момент пролета спутником на ДН стенда $D_{st}=-1$ нТл; $K_p=0$. Индекс AE в течение суток оставался постоянным и во время пролета спутника был равен 47 нТл, а W_p -индекс = 2.7. 26 августа состояние космической погоды было так же спокойным.

Вариации ПЭС, зарегистрированные 24 и 26 августа 2014 г., представлены на рис. 3, 4 соответственно. Из рис. 3 видно, что: во-первых, вариации ПЭС коррелируют с режимом излучения мощной радиоволны; во-вторых, для всех измерительных пунктов характерно значительное понижение электронной концентрации до 0.2 TECU; в-третьих, крупномасштабное ионосферное возмущение распространяется в направлении восток – запад (от п. Казань к п. Васильсурск). Стоит отметить, что использованный 24 августа и 26 августа 2014 г. режим излучения мощной радиоволны: 8 мин – нагрев, 4 мин – пауза, является наиболее эффективным, относительно других режимов, использовавшихся в представленных экспериментах. Когда длительность нагрева составляет менее 6 мин, область пониженной концентрации не успевает вернуться в стационарное – «донагревное» состояние в момент паузы между циклами воздействия, в силу чего на следующем цикле изучения наблюдается усиление эффекта понижения концентрации электронов.

Заметим так же, что для «прогрева» ионосферы требуется минимум один цикл излучения до влета

спутника в ДН стенда. Вариации ПЭС так же регистрируются в течение 10–12 мин после вылета спутника из ДН.

На рис. 4 представлены результаты измерения вариаций ПЭС полученные 26 августа 2014 г. Для п. Васильсурск наблюдается сильное понижение электронной концентрации, до 0.4 TECU в середине интервала пролета спутником ДН.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-02-00957-а, 15-32-50539_мол_нр; 14-02-31459_мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.

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.

<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>.

<http://isgi.latmos.ipsl.fr/lesdonne.htm>.

<http://www.izmiran.ru/services/iweather/storm>.

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия*

²*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия*