

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ  
В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ СТИМУЛИРОВАННОЙ МОЩНЫМ НАЗЕМНЫМ  
РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ НА СЕТИ ГНСС-СТАНЦИЙ**

**Д.А. Когогин<sup>1</sup>, И.А. Насыров<sup>1</sup>, С.М. Грач<sup>2,3</sup>, А.В. Шиндин<sup>2,3</sup>, Р.В. Загретдинов<sup>1</sup>,  
Р.Р. Шаймухаметов<sup>1</sup>, М.И. Рябова<sup>4</sup>, А.В. Кислицин<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Казанский (Приволжский) федеральный университет,  
420008, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Кремлевская, 18,  
E-mail: dkogogin@kpfu.ru, legal\_26.06@mail.ru*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский радиофизический институт,  
603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а,  
E-mail: sgrach@rf.unn.ru, freaz@bk.ru*

<sup>3</sup>*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
603950, Россия, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23,  
E-mail: sgrach@rf.unn.ru, freaz@bk.ru*

<sup>4</sup>*Поволжский государственный технологический университет,  
424000, Россия, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3,  
E-mail: miryabova@mail.ru*

Представлены результаты измерения полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли при воздействии на нее мощного коротковолнового радиоизлучения стенда «Сура» на сети ГНСС станций. В ходе 4 экспериментальных компаний (март 2010, март 2013, май 2013, ноябрь 2013) обнаружено и подтверждено наличие вариаций ПЭС на траектории распространения сигнала от спутника GPS пролетавшего над возмущенной областью. Вариации ПЭС достигают 0.15–0.3 TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$ ).

**STUDIES OF TOTAL ELECTRON CONTENT VARIATIONS OF IONOSPHERE CAUSED BY  
POWERFUL RADIO EMISSION ON NETWORK OF GNSS-RECEIVERS**

**D.A. Kogogin<sup>1</sup>, I.A. Nasyrov<sup>1</sup>, S.M. Grach<sup>2,3</sup>, A.V. Shindin<sup>2,3</sup>, R.V. Zagretdinov<sup>1</sup>,  
R.R. Shaimukhametov<sup>1</sup>, M.I. Ryabova<sup>4</sup>, A.V. Kislichin<sup>4</sup>**

The results of observations of ionospheric total electron content (TEC) variations caused by powerful radio emission of SURA facility are presented in the report. Measurements of TEC variations were carried out during several experimental companies from 2010 to 2013 years. Parameters of TEC variations are obtained by dual-frequency global navigation satellite systems (GNSS) diagnostics. Registration of signal parameters from GNSS-transmitters performed at four spatially separated sites: Vasil'sursk, Zelenodolsk, Kazan and Ioshkar-Ola. TEC variations correlated with pumping of ionosphere by SURA facility were detected. Magnitudes of TEC variations reached 0.15–0.3 TECU.

**Введение**

В результате воздействия на ионосферу мощным наземным радиоизлучением, в области отражения мощной радиоволны образуются неоднородности электронной концентрации с размерами от десятков сантиметров до десятков километров [1]. Неоднородности электронной концентрации с масштабами 5÷50 км могут эффективно изучаться с помощью двухчастотного радиозондирования сигналами спутников систем GPS и ГЛОНАСС [2]. При распространении через возмущенную область ионосферы, у таких сигналов появляется дополнительный набег фазы, обусловленный дисперсией радиоволн в ионосферной плазме и линейно связанный с полным электронным содержанием (ПЭС) на траектории распространения сигнала.

В течение 2013 г. было проведено четыре серии измерений ПЭС в ионосфере при воздействии на нее мощным радиоизлучением стенда «Сура». Возмущенная область ионосферы создавалась стендом над районом поселка Васильсурск (56.15° N, 46.10° E) (рис. 1). Для воздействия на ионосферу во всех сеансах использовалась волна обыкновенной поляризации. Диаграмма направленности антенной системы (ДНАС) стенда «Сура» ориентировалась либо в зенит, либо наклонялась на юг на 12° в область «Магнитного зенита».

Частота воздействия ( $f_B$ ) выбиралась исходя из условия  $f_B < f_0F2$ , критическая частота F2-слоя варьировалась в пределах от 4.4 до 6.0 МГц. Эффективная излучаемая мощность на выбранных

частотах составляла  $65 \div 150$  МВт в зависимости от количества задействованных в работе передатчиков стенда, антенных секций и рабочей частоты.

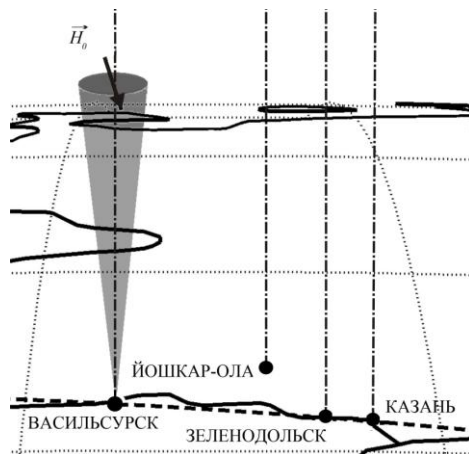


Рис. 1. Постановка эксперимента.

На рис. 1 отображено положение возмущенной области ионосферы в предположении, что область плазменных резонансов [1] находится на высоте  $\sim 250$  км от поверхности Земли. ДНАС стенда «Сура» направлена вертикально вверх, ширина главного лепестка составляет  $12^\circ$ . Вектор  $\vec{H}_0$  показывает направление геомагнитного поля в области возмущения ионосферы. Штриховой линией на поверхности Земли показано положение геомагнитной широты п. «Васильсурск». Параметры геомагнитного поля были рассчитаны при помощи Мировой модели магнитного поля Земли (WMM-2010) [3]. Вертикальными штрихпунктирными линиями показаны радиотрассы навигационный спутник – сеть ГНСС радиоприемников, в момент времени, когда спутник находится строго над центром возмущенной области ионосферы.

Регистрация сигналов от ГНСС осуществлялась в пространственно-разнесенных пунктах: п. «Васильсурск» (расположен непосредственно на территории радиополигона, 400 м от антенной системы стенда «Сура»; используется ГНСС-приемник «Prego-T»); п. «Зеленодольск» (расположен –  $55^\circ 52' N$ ,  $48^\circ 33' E$ ; используется ГНСС-приемник TrimbleNet R9); п. «Казань» (расположен –  $55^\circ 48' N$ ,  $49^\circ 08' E$ ); п. «Йошкар-Ола» (расположен –  $56^\circ 38' N$ ,  $47^\circ 52' E$ ; используется ГНСС-приемник NovAtel FlexPak-V2). Пункты «Васильсурск», «Зеленодольск» и «Казань» расположены вдоль геомагнитной широты стенда «Сура» (рис. 1).

В докладе представлены результаты трех экспериментальных дней: 12 марта 2013 г.; 16 мая 2013 г. и 7 ноября 2013 г.

#### Методика обработки экспериментальных данных

Данные для обработки представляют собой файлы в формате RINEX [4]. Расчет орбитального движения навигационных спутников производился с помощью файлов навигационных сообщений входящих в состав RINEX файла в соответствии с интерфейсным контрольным документом [5]. Для определения ПЭС использовалась методика, описанная в работе [2]. Вариации ПЭС выражены в общепринятой единице измерения  $TECU$  ( $1 TECU = 10^{16}$  эл/м<sup>2</sup>).

Для детального изучения малых вариаций ПЭС из исходной зависимости  $I(t)$  (ПЭС от времени), удалялся тренд при помощи вычитания скользящего среднего с линейной весовой функцией:

$$dI(t) = I(t) - \frac{1}{N} \sum_{n=j-N}^{j+N} \left( \frac{I(t) \cdot |N - |n - j||}{N} \right) \quad (1)$$

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

В экспериментах, где регистрация данных велась с частотой оцифровки 1 Гц,  $N$  численно равно времени усреднения в секундах. При обработке экспериментальных данных  $N = 1001$  (частота оцифровки 1 Гц);  $N=201$  (частота оцифровки 0.2 Гц).

В каждой из экспериментальных компаний (март 2013 г.; май 2013 г.; ноябрь 2013 г.) для дальнейшей обработки выбирались записи по двум навигационным спутникам (НС). Один из которых пересекал ДНАС станда «Сура» над п. Васильсурск во время проведения «нагревных» экспериментов. Второй всегда выбирался таким образом, что бы радиотрассы навигационный спутник (НС) – ГНСС-сеть гарантированно проходили в стороне от возмущенной области ионосферы.

### Экспериментальные результаты

12 марта 2013 года НС GPS № 09 (рис. 2, а) двигался с северо-запада на юг таким образом, что радиотрасса GPS № 9–Васильсурск проходила через возмущенную область ионосферы (Большим эллипсом на рис. 2, а–в обозначено местоположение проекции главного лепестка ДНАС станда «Сура» на высоте пролета GPS-спутников  $\sim 20\,000$  км). Режим работы передатчиков: [+5м –2м] (5 мин нагрев, 2 мин пауза); Частота воздействия  $f_B=4740$  кГц; ДНАС станда «Сура» наклонена на 12 градусов на юг в направлении «Магнитного зенита»; Время включения нагрева – 16:39 UTC; время выключения – 19:00 UTC. Параллельно с данными радиопросвечивания ионосферы со спутника GPS №09 анализировались данные со спутника GPS №28 (рис. 4, а), который в это же время проходил с юга на северо-восток таким образом, что радиотрассы GPS №28–ГНСС-сеть гарантированно не проходили через область ионосферы, возмущенную мощным радиоизлучением станда «Сура», и лежали вне плоскости геомагнитной широты.

16 мая 2013 г. время включения нагрева – 18:50–19:40 UTC. Вариации ПЭС регистрировались на траектории движения спутника GPS № 29, который пролетал над ДНАС станда «Сура» в интервале 19:02–19:24 UTC (рис. 3, б). Параллельно велась регистрация ПЭС на траектории движения спутника GPS № 25 (рис. 4, б), который проходил таким образом, что радиотрассы НС – ГНСС-сеть не пересекали ДНАС станда. Режим работы передатчиков станда «Сура»: [+7м -3м] (7 мин нагрев, 3 мин пауза); частота воздействия  $f_B=5828$  кГц. ДНАС станда направлена вертикально вверх.

7 ноября 2013 г. «нагрев» ионосферы осуществлялся с 14:41 по 17:46 UTC. Вариации ПЭС регистрировались на траектории движения спутника GPS № 32, который пролетал над ДНАС станда «Сура» в интервале 15:31–15:44 UTC (рис. 3, в). Параллельно велась регистрация ПЭС на траектории движения спутника GPS № 20 (рис. 4, в), который проходил таким образом, что радиотрассы НС–ГНСС-сеть не пересекали ДНАС станда «Сура». Режим работы передатчиков станда «Сура»: [+5м –5м] (5 мин нагрев, 5 мин пауза); частота воздействия  $f_B=4520$  кГц. ДНАС станда направлена вертикально вверх.

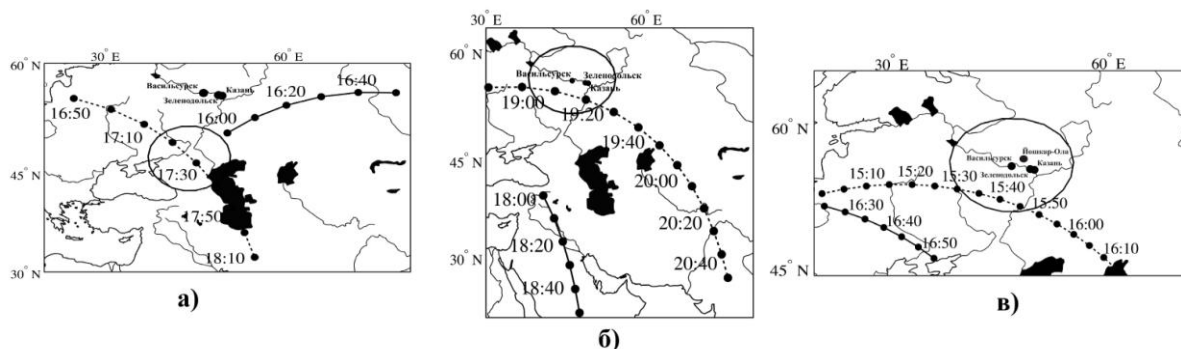


Рис. 2. Расположение пунктов приема сигналов от ГНСС (точки на карте); линия с маркерами времени – трасса и время (UTC) прохождения спутника а) GPS № 09 и GPS № 28 (12.03.2013); б) GPS № 29 и GPS № 25 (16.05.2013); в) GPS № 32 и GPS № 20 (07.11.2013). Сплошным овалом на рисунках обозначена проекция главного лепестка ДНАС станда «Сура» на высоте пролета спутников ( $\sim 20\,000$  км). Пунктирной линией показана траектория движения спутника, радиотрасса которого пересекает ДНАС станда «Сура»; сплошной линией – траектория спутника проходящего мимо.

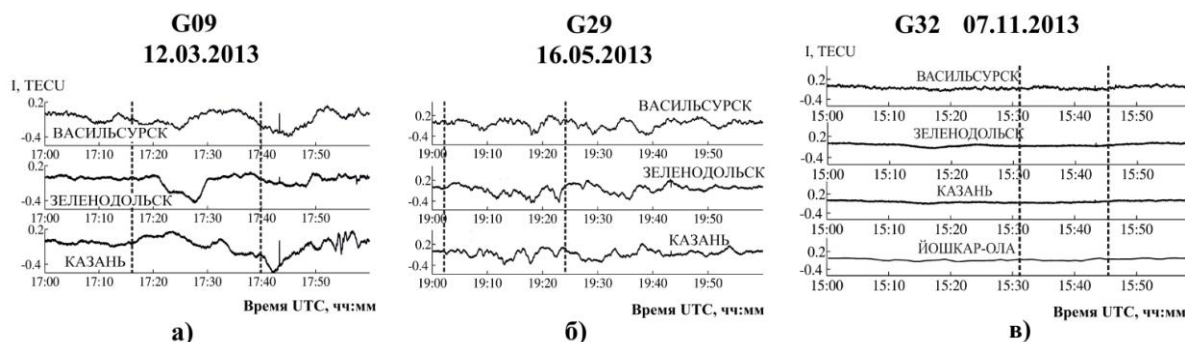


Рис. 3. Вариации ПЭС а) GPS 09; б) GPS № 29; в) GPS № 32. Вертикальными пунктирными линиями отмечено время пересечения спутником ДНАС стенда «Сура».

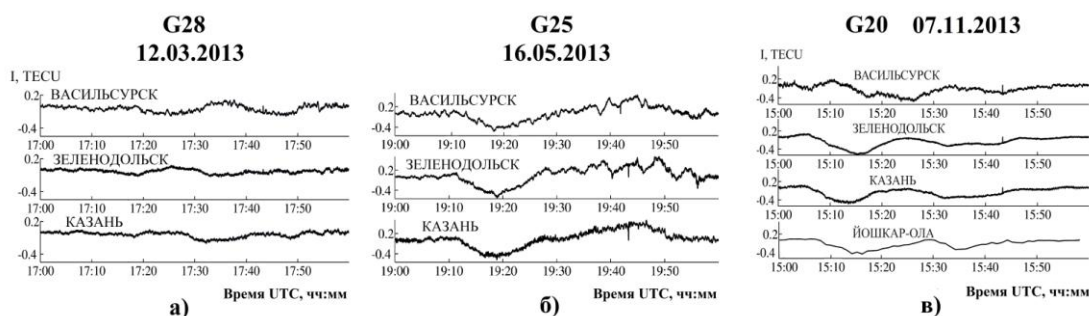


Рис. 4. Вариации ПЭС а) GPS 28; б)GPS № 25; в)GPS № 20.

### Заключение

Представленные в работе результаты позволяют сделать вывод о проявлении вариаций ПЭС (0.1–0.3 TECU) для трех пунктов наблюдения (Васильсурск, Зеленодольск, Казань) расположенных вдоль геомагнитной широты стенда «Сура». В эксперименте 7 ноября 2013 г. вариации ПЭС не были зарегистрированы. Вероятно, это обусловлено тем, что навигационный спутник GPS № 32 хоть и проходила над ДНАС стенда «Сура» (см. рис. 2, в), при этом не пересекал возмущенную область. Сопоставление вариаций ПЭС, полученных для трех приемных пунктов (Васильсурск, Зеленодольск, Казань) расположенных вдоль одной геомагнитной широты, позволило определить скорость распространения крупномасштабного ионосферного возмущения, стимулированного мощной радиоволной вдоль геомагнитной широты, которая составила ~300 м/с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 12-02-00513-а, 13-02-00957-а и 14-02-31459-мол\_а).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере / А.В. Гуревич // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, № 11. С. 1145–1177.
2. Рябов А.В. Исследование характеристик крупномасштабных неоднородностей ионосферы, вызванных воздействием на нее мощного коротковолнового радиоизлучения, с помощью сигналов GPS / А.В. Рябов, С.М. Грач, А.В. Шиндин, Д.С. Котик // Известия вузов. Радиофизика, 2011. Т. LIV, № 7. С. 485–496.
3. The World Magnetic Model. (WMM–2010) [электронный ресурс] // <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/DoDWMM.shtml>.
4. Werner G., Lou E. The Receiver Independent Exchange Format (RINEX) version 2.11 / перевод на русский язык: Чукин В.В., Кононова Е.А. Российский государственный гидрометеорологический университет. 2008. 42 с.
5. INTERFACE SPECIFICATION IS-GPS-200 Revision E Navstar GPS Space Segment Navigation User Interfaces / 8 June 2010.