

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ПОМОЩЬЮ ДВУХЧАСТОТНОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ СИГНАЛАМИ СПУТНИКОВ ГЛОНАСС

*Д. А. Когогин, И. А. Насыров*

Казанский (Приволжский) федеральный университет (КФУ)

Представлены результаты измерения полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли при воздействии на неё мощного коротковолнового радиоизлучения стенда «Сура» на сети ГНСС-станций (Глобальные Навигационные Спутниковые Системы) в пространственно-разнесённых пунктах, расположенных вдоль геомагнитной широты стенда «Сура»: пос. Васильсурск, пос. Зеленодольск; пос. Казань. В ходе нескольких экспериментальных компаний были выбраны дни, когда во время работы стенда «Сура» спутники ГЛОНАСС (ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система) пролетали над диаграммой направленности антенной системы (ДНАС) стенда. По результатам обработки полученных данных обнаружено и подтверждено наличие вариаций ПЭС на траектории распространения сигнала от спутника ГЛОНАСС пролетавшего над возмущённой областью. Вариации ПЭС достигают 0,15...0,3 TECU ( $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ эл/м}^2$ ).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-02-00957-а).

*Ключевые слова:* ионосфера; полное электронное содержание; ПЭС; крупномасштабные ионосферные неоднородности; GPS; стенд «Сура»; мощное коротковолновое радиоизлучение.

Для планирования и постановки эксперимента по диагностированию флуктуаций электронной плотности ионосферной плазмы разработана методика детектирования крупномасштабных неоднородностей, стимулированных мощным наземным радиоизлучением стенда «Сура». В качестве источников сигналов используются навигационные спутники ГЛОНАСС, излучающие в микроволновом диапазоне.

Возмущённая область ионосферы создавалась стендом над районом посёлка Васильсурск в загородной лаборатории Научно-исследовательского радиофизического института (НИРФИ) «Васильсурск» ( $56^\circ 09'$  с. ш.,  $46^\circ 06'$  в. д.) (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 к югу на  $12^\circ$  в область «Магнитного зенита».

Частота воздействия ( $f_B$ ) выбиралась исходя из условия  $f_B < f_oF2$ , критическая частота  $F2$ -слоя ( $f_oF2$ ) варьировалась в пределах от 4,4 до 6,0 МГц. Эффективная излучаемая мощность на выбранных частотах составляла 65...150 МВт в зависимости от количества задействованных в работе передатчиков стенда, антенных секций и рабочей частоты.

Регистрация сигналов от навигационных спутников осуществлялась в пространственно-разнесённых пунктах, расположенных вдоль геомагнитной широты стенда «Сура»: пос. Васильсурск (расположен в непосредственной близости антенной системы стенда «Сура»); использовался ГНСС-приёмник

**Когогин** Денис Александрович — аспирант, [dkogogin@kpfu.ru](mailto:dkogogin@kpfu.ru)

**Насыров** Игорь Альбертович — кандидат физико-математических наук, доцент, [inasurov@kpfu.ru](mailto:inasurov@kpfu.ru)

Prego-T); пос. Зеленодольск (55° 52' с. ш., 48° 33' в. д.; использовался ГНСС-приёмник Trimble NetR9); пос. Казань (55° 48' с. ш., 49° 08' в. д.; используется ГНСС-приёмник Trimble NetR9). Расстояния между измерительными пунктами: Васильсурск-Зеленодольск — ~160 км; Васильсурск-Казань — ~200 км. Каждый из ГНСС-приёмников позволял осуществлять непрерывную запись сигналов от систем ГЛОНАСС и GPS (Global Positioning System — система глобального позиционирования). Принимаемые от навигационных спутников радиосигналы позволяли проводить следующие типы измерений: 1) псевдодальномерные измерения по P- и C/A-коду; 2) фазовые измерения поддиапазонов L1 и L2 (L1 ГЛОНАСС — 1602 МГц + К (562,5 кГц); L2 ГЛОНАСС — 1246 МГц + К (437,5 кГц), где К — номер несущей частоты от -7 до +6).

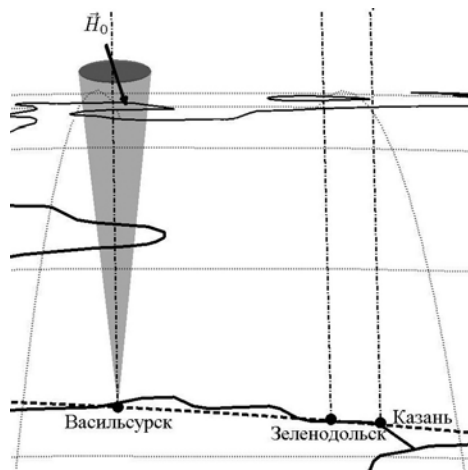


Рис. 1. Постановка эксперимента по измерению вариаций ПЭС во время воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением стенда «Сура»

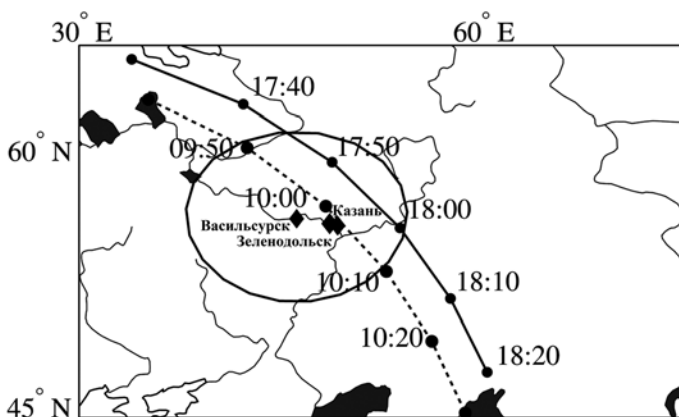
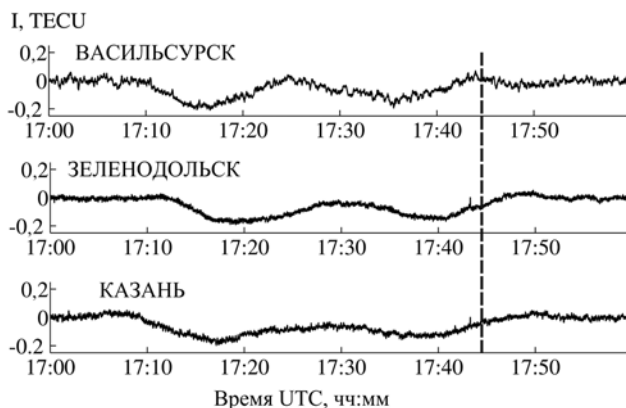
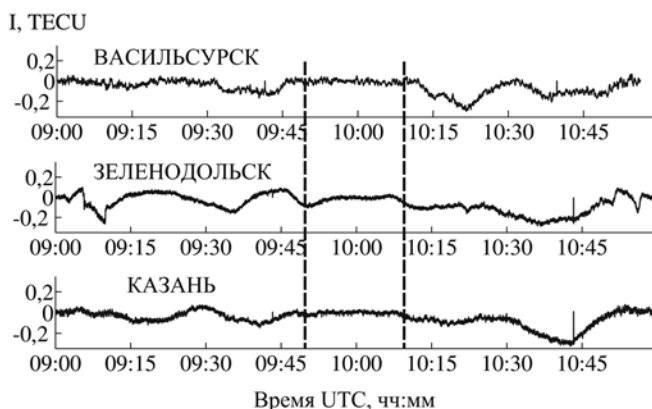


Рис. 2. Расположение пунктов приёма сигналов от ГНСС (отмечено ромбами на карте); линия с маркерами времени (отмечены точками) — трасса и время (UTC) прохождения спутника ГЛОНАСС № 10 (сплошная линия) и GPS № 04 (пунктирная линия) 14.03.2013 г.



**Рис. 3.** Вариации ПЭС, зарегистрированные для трёх пунктов наблюдения (Васильсурск, Зеленодольск, Казань) 14.03.2013 г. для спутника ГЛОНАСС № 10 (вертикальными пунктирными линиями отмечен интервал пролёта спутника ГЛОНАСС № 10 над ДНАС стенда «Сура» (большой эллипс на рис. 2)). Режим излучения мощной волны — 2 мин нагрев, 2 мин — пауза



**Рис. 4.** Вариации ПЭС зарегистрированные для трёх пунктов наблюдения (Васильсурск, Зеленодольск, Казань) 14.03.2013 г. для спутника ГЛОНАСС № 04 (вертикальными пунктирными линиями отмечен интервал пролёта спутника ГЛОНАСС № 04 над ДНАС стенда «Сура» (большой эллипс на рис. 2)); режим излучения мощной волны — 2 мин нагрев, 2 мин — пауза

14 марта 2013 г. над стендом «Сура» проходили два спутника в утренние и вечерние часы (рис. 2–4). Нагрев ионосферы 14.03.2013 г. производился в интервалах времени 09:00–14:49 и 17:00–18:09 (UTC) на частотах воздействия ( $f_B$ ) 8,1 МГц/8,8 МГц и 4,74 МГц соответственно. ДНАС была направлена вертикально вверх. На рис. 2 представлена проекция орбитального движения спутников ГЛОНАСС № 10 и ГЛОНАСС № 04 на поверхность Земли. Большим эллипсом (рис. 2) обозначено местоположение проекции главного лепестка ДНАС стенда «Сура» на высоте пролёта спутников ГЛОНАСС.

Расчёт орбитального движения спутников производился с помощью файлов навигационных сообщений, входящих в состав RINEX-файла [Werner, Lou,

2008]. Для определения ПЭС использовалась методика, описанная в работах [Рябов и др., 2011; Шиндин и др., 2012]. Результаты обработки вариаций ПЭС для измерений 14 марта 2013 г. представлены на рис. 3 и 4. Вертикальными пунктирными линиями (см. рис. 3, 4) отмечено время пересечения спутником ДН стенда «Сура» (временной интервал пролёта ДН).

7 ноября 2013 г. над стендом «Сура» проходил спутник ГЛОНАСС № 03 в ночные часы (время московское, МСК) (рис. 5). Нагрев ионосферы 07.11.2013 г. производился в интервале 14:41–17:46 (всемирное координированное время, Coordinated Universal Time, UTC) на частотах воздействия ( $f_B$ ) 4,54 МГц. ДНАС была направлена вертикально вверх. На рис. 5 представлена проекция орбитального движения спутника ГЛОНАСС № 03 на поверхность Земли.

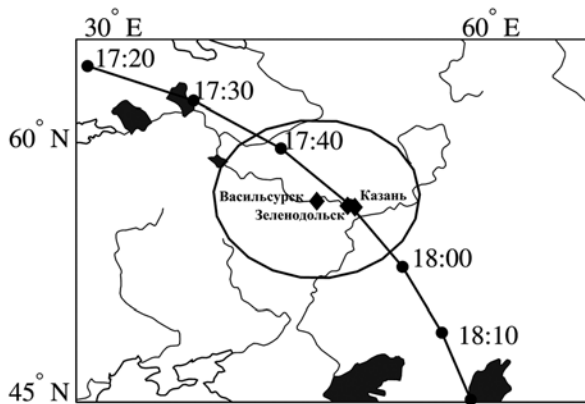


Рис. 5. Расположение пунктов приёма сигналов от ГНСС (отмечено ромбами на карте); линия с маркерами времени (отмечены точками) — трасса и время (UTC) прохождения спутника ГЛОНАСС № 03 (сплошная линия) 07.11.2013 г.

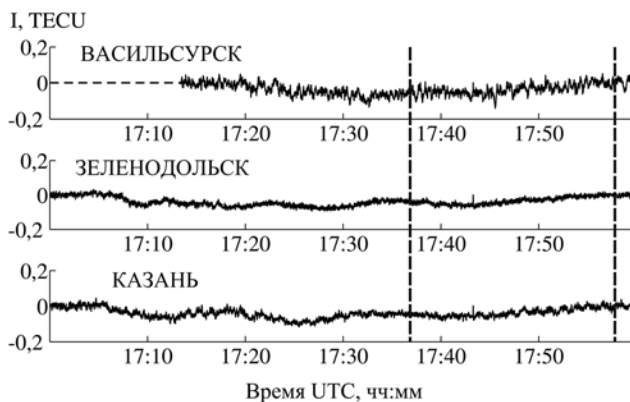


Рис. 6. Вариации ПЭС, зарегистрированные для трёх пунктов наблюдения (Васильсурск, Зеленодольск, Казань) 14.03.2013 г. для спутника ГЛОНАСС № 03 (вертикальными пунктирными линиями отмечен интервал пролёта спутника ГЛОНАСС № 03 над ДНАС стенда «Сура» (большой эллипс на рис. 2)); режим излучения мощной волны — 5 мин нагрев, 5 мин — пауза

Магнитуа вариаций ПЭС для всех трёх пунктов наблюдения (Васильсурск, Зеленодольск, Казань) (рис. 6) составляет 0,15...0,3 TECU. Вариации коррелируют со временем нагрева ионосферы мощной радиоволной. Скорость распространения крупномасштабного ионосферного возмущения, стимулированного мощной радиоволной, вдоль геомагнитной широты составляет порядка 320 м/с в направлении запад-восток. По предварительным оценкам поперечный масштаб неоднородностей составляет порядка 30...60 км.

Кроме того, зарегистрировано понижение ПЭС (до 0,4 TECU) во всех трёх пунктах наблюдения, связанное с прохождением солнечного терминатора вдоль линии Казань-Зеленодольск-Васильсурск, т. е. в направлении восток-запад.

В заключение необходимо отметить, что остаётся открытым вопрос о физике процессов, лежащих в основе генерации крупномасштабных ионосферных неоднородностей под воздействием высокочастотной мощной радиоволны, распространяющейся на столь большие расстояния (~200 км) поперёк силовых линий геомагнитного поля.

## ЛИТЕРАТУРА

- [Рябов и др., 2011] *Рябов А. В., Грач С. М., Шиндин А. В., Котик Д. С.* Исследование характеристик крупномасштабных неоднородностей ионосферы, вызванных воздействием на неё мощного коротковолнового радиоизлучения, с помощью сигналов GPS // Известия ВУЗов. Радиофизика. 2011. Т. 54. № 7. С. 485–496.
- [Шиндин и др., 2012] *Шиндин А. В., Грач С. М., Сергеев Е. Н., Рябов А. В.* Пространственная корреляция крупномасштабных неоднородностей плотности (по данным анализа GPS-сигналов) и искусственного оптического свечения в линии 630 нм в ионосфере, возмущенной мощной радиоволной // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2012. № 4(1). С. 105–113.
- [Werner, Lou, 2008] *Werner G., Lou E.* The Receiver Independent Exchange Format (RINEX). v. 2.11 / Пер. на рус. яз. Чукин В. В., Кононова Е. А. М.: РГТУ, 2008. 42 с.

## RESEARCH OF LARGE IONOSPHERIC IRREGULARITIES USING BY DUAL FREQUENCY SOUNDING GLONASS

*D. A. Kogogin, I. A. Nasyrov*

Kazan (Volga region) federal university (KFU)

The results of observations of ionospheric total electron content (TEC) variations caused by powerful radio emission of SURA facility are presented in the report. 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: Vasilsursk, Zelenodolsk, Kazan. TEC variations correlated with pumping of ionosphere by SURA facility were detected. Magnitudes of TEC variations reached 0.15...0.3 TECU.

*Keywords:* ionosphere, TEC, large-scale irregularities, GLONASS, GPS, powerful radio emission.

**Kogogin** Denis Aleksandrovich — postgraduate, dkogogin@kpfu.ru

**Nasyrov** Igor Albertovich — associate professor, PhD, inasyrov@kpfu.ru