

## ИЗМЕРЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ВДОЛЬ ГЕОМАГНИТНОЙ ШИРОТЫ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ НАГРЕВНОГО СТЕНДА «СУРА». ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЗА 2013 – 2014 гг.

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>

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

<sup>2</sup>Научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ), Н. Новгород, Россия

<sup>3</sup>Нижегородский госуниверситет им. Н.И. Лобачевского, Н. Новгород, Россия

E-mail: denis.kogogin@gmail.com

### Введение

Известно [1], что при воздействии на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением, в области отражения возникают крупномасштабные неоднородности электронной концентрации, которые могут эффективно изучаться с помощью радиосигналов микроволнового диапазона, излученных с борта спутников систем «Navstar» (GPS) и/или ГЛОНАСС [2-4]. Такие исследования проводились на стендах HAARP [3] и «Сура» [2,4]. Полученные ранее результаты свидетельствуют об увеличении полного электронного содержания (ПЭС) в дневное время, коррелированном с воздействием мощной радиоволны, и о понижении ПЭС при воздействии после захода солнца. Ранее в работе [5], было отмечено, что при наклоне диаграммы направленности стенда «Сура» на  $12^\circ$  к югу в плоскости геомагнитного меридиана, регистрировалось как заметное уменьшение ПЭС в возмущённой области, так и длиннопериодные ( $10 \div 15$  мин) вариации ПЭС относительно среднего значения. На основании полученных результатов авторами сделано утверждение о проявлении эффекта «магнитного зенита». В тоже время остается открытым вопрос механизма распространения крупномасштабных ионосферных возмущений, стимулированных мощной радиоволной поперек силовых линий магнитного поля.

В докладе представлены данные, полученные в серии экспериментов, проведенных на стенде «Сура» расположенного в загородной лаборатории ФБГНУ НИРФИ «Васильсурск» ( $56^\circ 09'$  с.ш.,  $46^\circ 06'$  в.д.) в 2013 – 2014 гг. Регистрация вариаций ПЭС производилась на сети наземных GPS-станций, расположенных вдоль геомагнитной широты (п. Васильсурск, п. Зеленодольск, п. Казань).

### Описание эксперимента

В течение 2013–2014 годов было несколько серий измерений ПЭС ионосферы при воздействии на неё мощным радиоизлучением стенда «Сура». Возмущенная область (ВО) ионосферы создавалась стендом над районом Васильсурска ( $56^\circ$  с.ш.,  $46^\circ$  в.д.). Для воздействия на ионосферу во всех сеансах использовалась волна обыкновенной поляризации. Диаграмма направленности (ДН) антенной системы стенда «Сура» ориентировалась либо в зенит, либо наклонялась на юг, по направлению геомагнитного поля, на  $12^\circ$  (в область магнитного зенита). Частота воздействия ( $f_v$ ) выбиралась исходя из условия  $f_v < f_0 F_2$ , критическая частота  $F_2$ -слоя варьировалась в пределах от 5,2 до 7,2 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.

Регистрация сигналов от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) осуществлялась в пространственно-разнесённых пунктах, расположенных вдоль геомагнитной широты (штриховая линия на рис. 1): п. Васильсурск (расположен непосредственно на территории радиополигона (500 м от антенной системы стенда «Сура»; использовался ГНСС-приёмник «Prego-T»); п. Зеленодольск (расположен - 55°52' с.ш., 48°33' в.д.; использовался ГНСС-приёмник Trimble Net R9); п. Казань (расположен - 55°48' с.ш., 49°08' в.д.; использовался ГНСС-приёмник 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 [1] находится на высоте ~250 км от поверхности Земли.

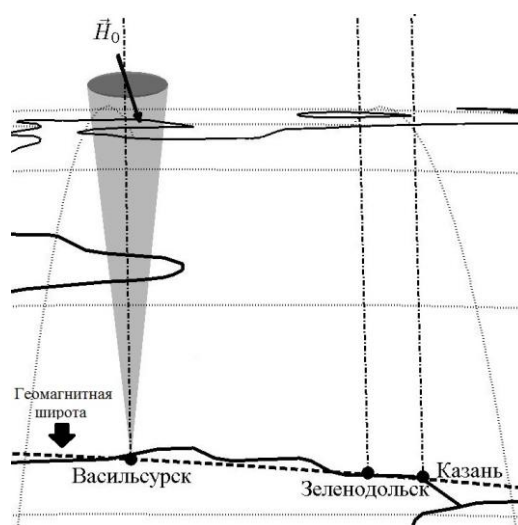


Рис. 1. – Постановка эксперимента

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 радиоприёмники в момент времени, когда спутник находится строго над центром возмущенной области ионосферы.

### Экспериментальные результаты

Исходные данные для обработки представляют собой файлы в формате RINEX. 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. Описание алгоритма детально представлено в работе [2].

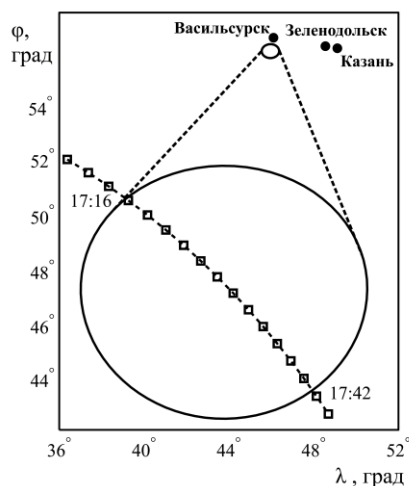


Рис. 2. – Расположение пунктов приёма сигналов от ГНСС (отмечены точками на карте); линия с маркерами времени (отмечены квадратами) – трасса и время (UTC) прохождения спутника GPS №09. (12.03.2013 г.). Местоположение проекции главного лепестка ДН станда «Сура» обозначено эллипсами: малым эллипсом на высоте 250 км; большим на высоте пролета спутников GPS (20200 км).

12.03.2013 г. спутник GPS №09 (рис. 2) двигался с северо-запада на юг таким образом, что радиотрасса GPS №09 – п. Васильсурск проходила через ВО ионосферы в интервале 17:16 – 17:42 UTC (пунктирная линия на рис. 2). Режим работы станда «Сура»: 5 мин – нагрев, 2 мин – пауза. Частота воздействия  $f_B = 4,7$  МГц. Критическая частота  $f_0F_2 = 5,22$  МГц. ДН станда «Сура» наклонена на  $12^\circ$  на юг в направлении магнитного зенита. Время включения мощного передатчика – 16:39 UTC; время выключения – 19:00 UTC. Результаты обработки вариаций ПЭС за 12 марта 2013 года приведены на рис. 3.

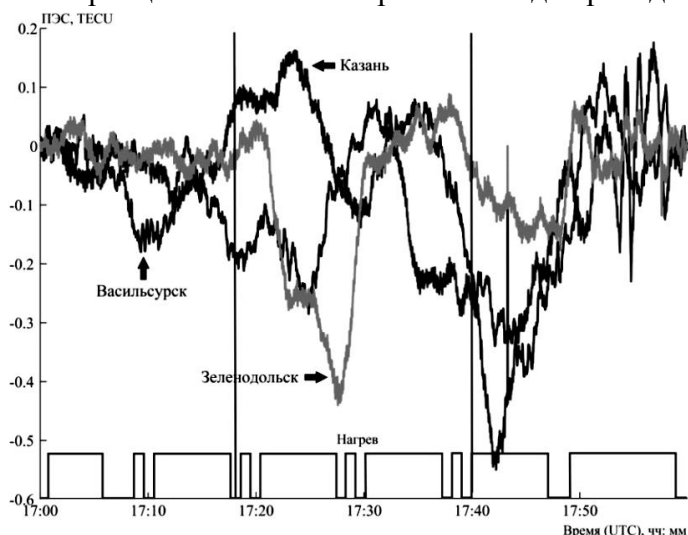


Рис. 3. – Вариации ПЭС, зарегистрированные в Васильсурске, Казани и Зеленодольске 12.03.2013 г. для спутника GPS №09.

Вертикальными сплошными линиями отмечен интервал пролета спутника GPS №09 над ДН станда «Сура». Режим излучения мощной волны – 5 мин. нагрев, 2 мин. – пауза. Импульсы в паузах нагрева связаны со сбоями в работе таймеров, управлявших режимом работы мощных передатчиков в этот период.

24.08.2014 г. спутник GPS №32 пересекал ВО в интервале 17:19 – 17:39 UTC (см. рис. 4); 26.08.2014 – в интервале 17:11 – 17:31 UTC. В обоих случаях ДН станда «Сура» была направлена вертикально вверх. 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 на [3 мин – нагрев, 3 мин – пауза]. 24 августа  $f_B = 4,74$  МГц,  $f_0F2 = 6,497$  МГц; 26 августа  $f_B = 5,64$  МГц,  $f_0F2 = 7,162$  МГц.

Из рис. 3 видно, что когда спутник находился вне ДН станда, вариации ПЭС незначительны и не превышают 0,1 TECU. При нахождении спутника в ДН станда относительный размах вариаций ПЭС достигает 0,2 TECU, а понижение концентрации составляет 0,4 – 0,5 TECU, что свидетельствует о генерации крупномасштабного ионосферного возмущения. Обращает на себя внимание то, что распространение этого возмущения происходит в направлении запад – восток, от п. Васильсурск к п. Казань.

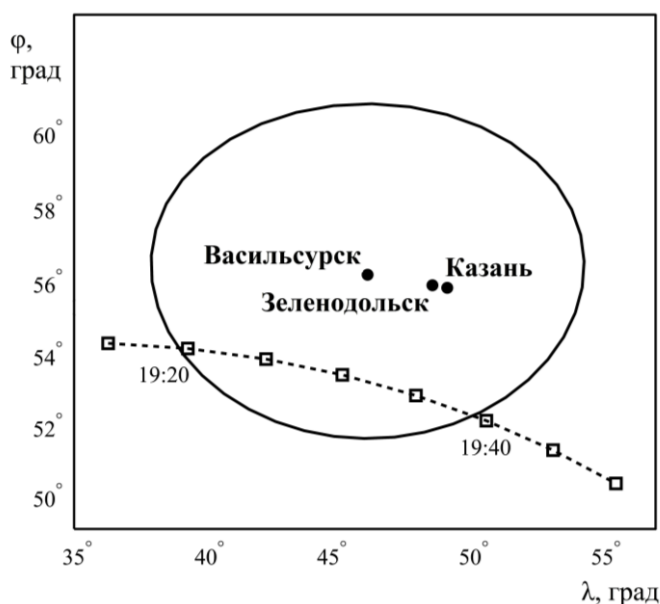


Рис. 4. – Расположение пунктов приёма сигналов от ГНСС (отмечены точками на карте); линия с маркерами времени (отмечены квадратами) – трасса и время (UTC) прохождения спутника GPS №32. (24.08.2014 г.). Местоположение проекции главного лепестка ДН станда «Сура» на высоте пролета спутников GPS (20200 км) обозначено большим эллипсом.

Вариации ПЭС, зарегистрированные 24 и 26 августа 2014 г., представлены на рис. 5 и 6 соответственно. Из рис. 5 видно, что: во-первых, вариаций 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), в отличие от случая 12.03.2013, представленного на рис.3. Стоит отметить, что использованный 24 и 26.08.2014 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 минут, 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.



Рис. 5. – Вариации ПЭС, зарегистрированные в Василиурске, 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».

Заметим, 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. 6 представлены результаты измерения вариаций ПЭС полученные 26.08.2014. Для п. Казань и п. Зеленодольск значительных вариаций ПЭС, представленных ранее (см. рис. 3 и 5), не зарегистрировано. В п. Василиурск наблюдается сильное понижение электронной концентрации, до 0,4 TECU в середине интервала пролета спутником ДН.

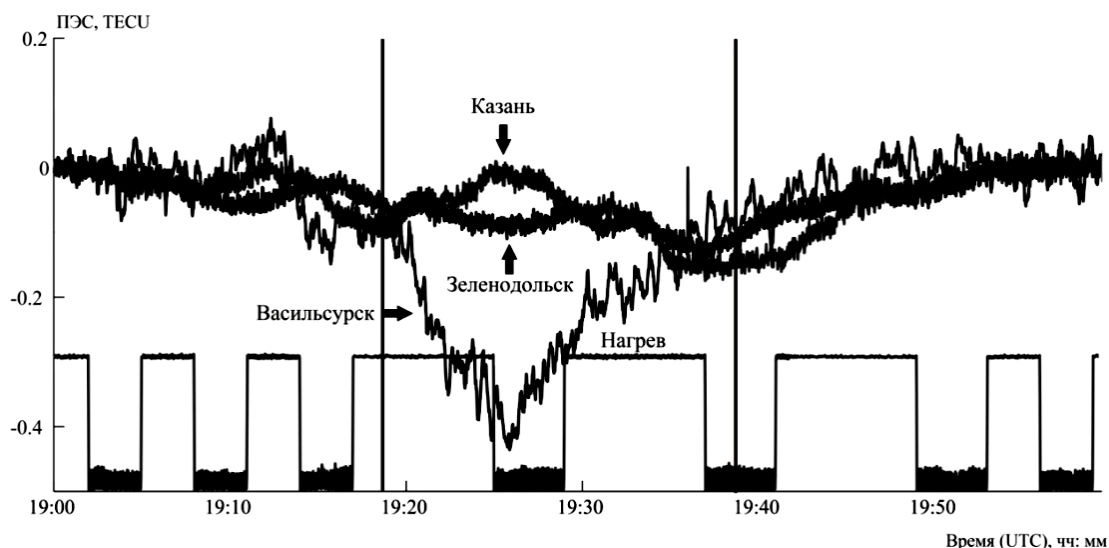


Рис. 6. – Вариации ПЭС, зарегистрированные в Василиурске, Казани и Зеленодольске 26.08.2014 г. для спутника GPS №32. Режим излучения мощной волны во время пролета спутником ДН стенда – 8 мин. нагрев, 4 мин. – пауза. Вертикальными сплошными линиями отмечен интервал пролета спутника GPS №32 над ДН стенда «Сура».

Вариации ПЭС вдоль геомагнитной широты, представленные в данной работе, позволяют сделать вывод о возникновении крупномасштабных ионосферных возмущений

в поле мощной радиоволны, которые распространяются вдоль геомагнитной широты. Физические механизмы возбуждения подобных возмущений и их переноса поперёк силовых линий магнитного поля в настоящее время не ясны. Поэтому требуется проведение новых экспериментов, а также глубокий анализ данных измерений с привлечением широкого спектра гелиогеофизических данных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-02-00957-а; 15-32-50539\_мол\_нр; 14-02-31459\_мол\_а) и РНФ (№ 14-12-00706).

#### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гуревич А. В. // УФН. 2007. Т. 77, № 11. С. 1145.
2. А.В. Рябов, С.М. Грач, А.В. Шиндин, Д.С. Котик // Известия вузов. Радиофизика Том LIV, № 7
3. Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. Art. no. L22102.
4. Фролов В. Л., Комраков Г. П., Куницын В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53, № 7. С. 421.
5. Терещенко Е. Д., Миличенко А. Н., Фролов В. Л., Юрик Р. Ю. // Изв. вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51, № 11. С. 934.