

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.034

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА НА СТЕНДЕ EISCAT В 2018 Г.

А.В. Тертышников<sup>1</sup>, Р.Ю. Юрик

<sup>1</sup>Институт прикладной геофизики, Москва, Россия



Памяти  
Романа Юрьевича Юрика  
(1967 - 2021)

**Аннотация.** Представлены результаты эксперимента в 2018 г. на нагревном комплексе EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия) по радиопросвечиванию границ трубки нагрева ионосферы. По результатам измерений подтвердились достаточно резкие градиенты ионосферной задержки сигналов КА ГНСС в высокоширотной ионосфере на границах трубки нагрева ионосферы, как и ранее в 2009 г. в среднеширотной ионосфере над нагревным стендом Сура (Васильсурск, Россия).

**Ключевые слова:** нагрев, ионосфера, стенд, EISCAT, Сура, ионосферные задержки, ГНСС.

### Введение

Нагревные стенды активно используются для исследования ионосферы. Для диагностики эффектов нагрева ионосферы активно используется метод радиопросвечивания сигналами Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1-6].

В марте 2009 г. с помощью радиопросвечивания над работающим стендом "Сура" удалось обнаружить значительные вариации фазы сигналов навигационных КА (НКА) GPS/ГЛОНАСС на границах и под областью искусственно возмущенной ионосферы [7-9].

В высокоширотной ионосфере эксперимент удалось повторить в 2018 г. на нагревном комплексе EISCAT/Heating (Тромсё, Норвегия).

### Эффект границ трубки нагрева над стендом «Сура»

В эксперименте 2009 г. в основном режиме работы стенда «Сура» использовались мощные импульсы излучения волны О-поляризации на частоте 4.3 МГц под углом 12° от вертикали на юг в плоскости геомагнитного меридиана [7, 8].

Диаграмма направленности ЭМИ стенда «Сура» формировалась тремя модулями стенда и имела «карандашную» форму с углом раскрытия ~ 12° по уровню половинной мощности и ~ 20° по уровню 0.1 P<sub>0</sub>, который соответствует эффективной мощности излучения, достаточно превышающей порог генерации тепловой (резонансной) параметрической неустойчивости P<sub>пор</sub> ≈ 1 МВт [9]. Отвечающая ей область засветки на высоте 250 км оценивалась размерами в 50 и 90 км по уровню мощности 0.5 и 0.1, соответственно. Расстояние от точки измерения до проекции на земную поверхность области воздействия составляло около 100 км. В зависимости от когерентности модулей стенда можно было ожидать сложную структуру потенциальных границ трубки нагрева. Вынос нагретой плазмы в трубке нагрева должен был обеспечить обеднение плотности плазмы и формирование условий для восстановления плотности, в том числе за счет притока извне.

При обработке сигналов ГНСС выяснилось, что работа стенда не влияет на стабильность работы приемника, который был развернут рядом с нагревным стендом. Измерения выполнялись при низком уровне геомагнитной активности, погода за весь период экспериментов была ясная, характерная для периода весеннего равноденствия. На основе полученной информации рассчитывалось полное электронное содержание (ПЭС или ТЕС – total electron contents).

Для диагностики потенциальных границ трубки нагрева ионосферы над стендом был выбран 20-й НКА GPS (G20), трасса которого проходила над зоной нагрева. В результатах радиопросвечивания возмущений ионосферы сигналами НКА в условиях нагрева ионосферы регулярными 3 минутными импульсами с мощностью 80 МВт были выявлены вариации ТЕС при пересечении НКА G20 трубки нагрева.

По критерию уменьшения плотности плазмы на величину 0.2 – 0.4 ТЕС примерная ширина области

обеднения, опирающейся на зону нагрева, вдоль  $H_0$  составила  $\sim 50$  км. Результаты расчетов показывают, что в этом случае относительное изменение плотности плазмы составляет 15–20%, что согласуется с данными томографических измерений [9].

Из-за небольших амплитуд вариаций ТЕС над зоной нагрева в анализе использовалось быстрое преобразование Фурье. В «скользящем окне» шириной в 16 отсчетов рассчитывались массивы периодограмм мощности вариаций анализируемых временных рядов. В рассчитанных периодограммах мощности анализируемых вариаций подтвердились достаточно четкие границы трубки нагрева на всех анализируемых периодах и сложная структура просвечиваемых стенок трубки нагрева, похожая на «гофру».

Метод спектрального анализа [10] был впервые применен при обработке данных сигналов ГНСС на стенде «Сура». При этом, над зоной возмущенной области ионосферы хорошо проявился эффект аномального изменения спектра с небольшим увеличением мощности на периоде 3 минуты в центре зоны. Общее снижение мощности вариаций сигналов в трубке нагрева обусловлено обеднением ионосферной плазмы. За 20 минут вектор «приемник – НКА» пересек на высоте 300 км зону шириной до 60 км.

Эффект изменения спектра мощности вариаций сигналов НКА GPS над границами области ионосферы над работающим нагревным стендом подтверждает и возможность диагностики дактов плотности в трубке магнитного поля над стендом в верхней ионосфере. Результаты эксперимента 2009 г. на «Суре» по большим градиентам плотности ионосферной плазмы на границах трубки нагрева были подтверждены в [11] измерениями при нагреве ионосферы на стенде EISCAT/Heating вблизи г. Тромсё (Норвегия).

### Результаты эксперимента над стендом EISCAT/Heating в 2018 г.

Очередной эксперимент над стендом EISCAT/Heating, подтверждающий проявление границ трубки нагрева, удалось провести Р.Ю. Юриком 8-18 октября 2018 г.

Стенд EISCAT/Heating состоит из 12 передатчиков по 120 кВт каждый. В качестве антенны для каждого из передатчиков используется ряд из 12 широкополосных диполей (всего 144, как и на «Суре»). Весь диапазон перекрывается двумя антенными решетками 2.8– 5.7 МГц и 5.3–8.2 МГц [5].

На рис. 1 показана проекция траектории пролета спутника ГЛОНАСС R21 в районе установки EISCAT/Heating 12.09.2018 г.

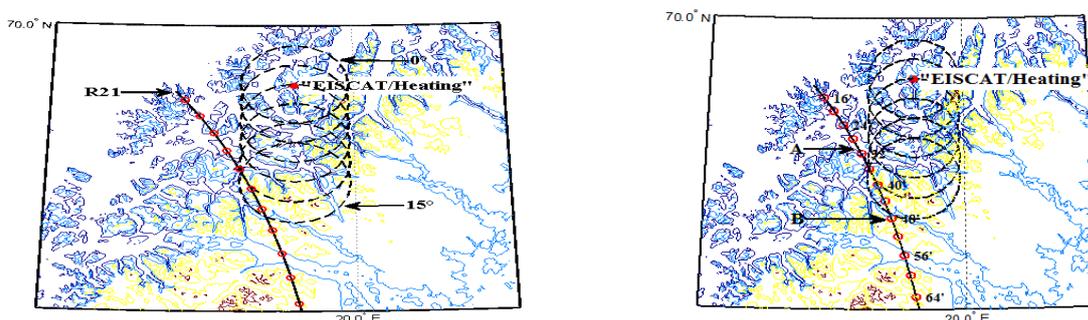


Рисунок 1. Проекция траектории пролета КА R21 вблизи нагревного стенда EISCAT 12.09.2018 г.

Во время эксперимента 12.09.2018 г. в период с 10:12 UT до 11:34 UT стенд работал в режиме сканирования по частоте и по углу наклона диаграммы направленности излучающей антенны. Нагрев велся в режиме 2 минуты излучение и 2 минуты пауза. В течение 2 минут излучения частота накачки менялась каждые 5 секунд на 5 кГц в интервале частот от 4.01 МГц до 4.12 МГц. Изменение направления диаграммы излучающей антенны менялось на  $3^\circ$  через каждые 4 минуты от направления в магнитный зенит ( $12^\circ$  к югу) до географического зенита ( $0^\circ$ ) после чего направление диаграммы направленности отклонялось на  $15^\circ$  к югу.

Штриховыми окружностями показаны области нагрева по уровню мощности -3 дБ при разных углах наклона диаграммы направленности излучающей антенны нагревного стенда во время эксперимента (от направления в географический зенит  $0^\circ$ , до  $15^\circ$  к югу).

Особенностью регистрируемых ионосферных задержек по траектории движения R21 на границах зоны нагрева являются повышенные градиенты ПЭС, которые были получены по фазовым измерениям 12.10.2018 с 09:20 до 12:27. Для выделения быстрых вариаций полного электронного содержания медленная составляющая, связанная с геометрическим фактором и фоновым полным содержанием вычиталась путем удаления тренда, аппроксимированного полиномом 5-го порядка.

На верхнем графике рис. 2 черными вертикальными стрелками отмечены границы области нагрева по широте, а на втором графике эти области указаны по долготе. Возвышение спутников ГЛОНАСС над горизонтом достигает 70 градусов. Это означает, что на широте Тромсё трасса «спутник-Тромсё» пересекает область нагрева близко к локальной вертикали почти вдоль локальной геомагнитной силовой линии «Тромсё». Это позволило по данным ионосферных задержек определить примерные границы (по широте и долготе) области нагрева, соответствующие экспериментам на нагревном стенде Сура.

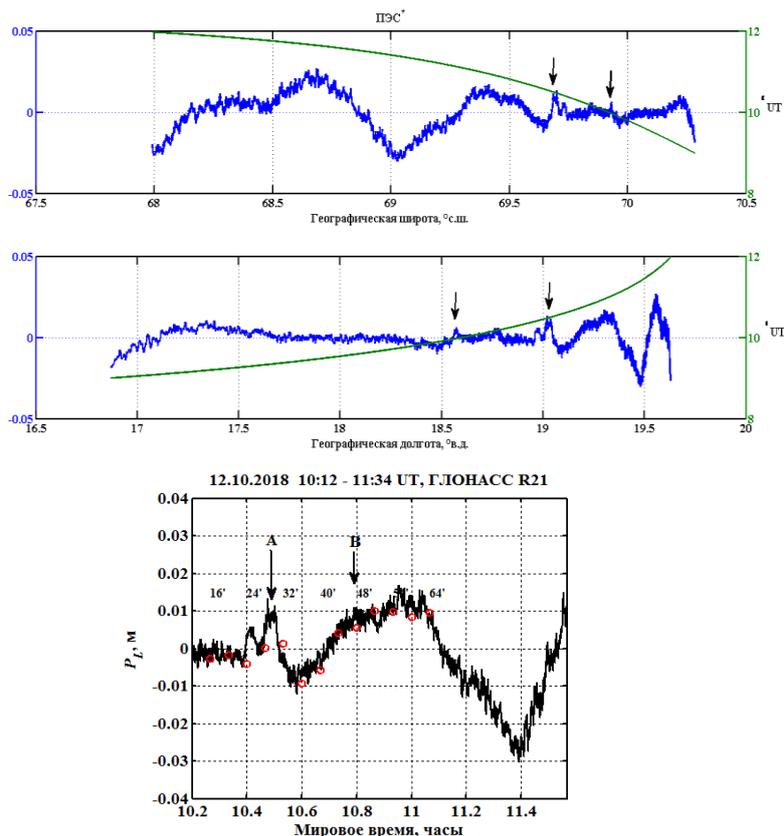


Рисунок 2. Вариации ПЭС по данным ионосферных задержек сигналов КА R21 в метрах.

## Заключение

В высокоширотной ионосфере подтвердилось увеличение градиентов ионосферных задержек на границах области нагрева, что свидетельствует о достаточно резких границах области (трубки) нагрева. Эффекты границ в среднеширотной и высокоширотной ионосфере оказались схожими.

## Литература

1. Тертышников А.В., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO) // Информация и космос. 2010. Т. 1. С. 100-105.
2. Тертышников А.В., Пулинец С.А. «Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации» / Заявка № 2011128236 от 07.07.2011 на получение патента РФ на изобретение. Бюллетень Изобретения. 2013 № 4. Решение о выдаче патента РФ на изобретение от 01.02.2013. Прекратил действия по неуплате пошлины.
3. Тертышников А.В. и др. Патент на изобретение № 2693842 «Способ зондирования ионосферы и тропосферы» / Заявка № 2018127892 от 30.06.2018. Опубл. 05.07.2019. Патентообладатель ФГБУ ИПГ.
4. Тертышников А.В. Патент на изобретение «Способ определения положения аврорального овала и состояния магнитного поля Земли». Заявка № 2015126532/28(041268) от 02.07.2015 г.
5. Тертышников А.В., Фролов В.Л. и др. Патент № 2560525 «Способ определения положения эпицентральной зоны источника и скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений» / Заявка № 2014125712. 22.07.2015 г. Срок действия до 25 июня 2034 г. Патентообладатель ФГБУ ИПГ.
6. Тертышников А.В. и др. Патент на изобретение № 2017111411 «Способ зондирования плазменного слоя геомагнитного хвоста и ионосферы Земли» / 04.04.2017. Дата регистрации: 06.06.2018. Опубликовано: 06.06.2018, Бюл. № 16. Патентообладатель ФГБУН ИРЭ РАН Фрязинский филиал.
7. Тертышников А.В., Скрипачев В.О., Большаков В.О. Эксперименты по диагностике плазменных возмущений в трубке магнитного силового поля Земли по сигналам навигационных космических аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. №3. С. 110-114.
8. Тертышников А.В., Суворцева И.В., Фролов В.Л., Смирнов В.М. Оценивание восстановленных по сигналам НКА ГЛОНАСС/GPS профилей электронной концентрации в ионосфере / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. - Москва: ИКИ РАН, 2010. Т. 3. С. 115-119.
9. Фролов В.Л. Искусственная турбулентность среднеширотной ионосферы. - Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2017. 468 с.
10. Тертышников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013. 278 с.
11. Терещенко Е.Д., Миличенко А.Н., Ритвельд М.Т., Черняков С.М., Швец М.В. Изменение высокоширотной ионосферы при нагреве мощной коротковолновой радиоволной установки EISCAT/Heating по данным сигналов спутника ГЛОНАСС и радара некогерентного рассеяния // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 1. С. 170-181. DOI: 10.21443/1560-9278-2018-21-1-170-181