



УДК 550.380; 551.508; 551.501

**ПРИМЕРЫ ПРОЯВЛЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПРИ
РАДИОПРОСВЕЧИВАНИИ ИОНОСФЕРЫ СИГНАЛАМИ КА ГНСС
В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА НИС «ПРОФЕССОР МОЛЧАНОВ» И «АКАДЕМИК
ФЕДОРОВ»**

А.В. Тертышников¹, Я.В. Глухов¹¹Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, Москва, Россия

Представлены результаты зондирования следов аврорального овала по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS в ходе экспериментов по зондированию высокоширотной ионосферы с научно-исследовательских судов «Академик Федоров» и «Профессор Молчанов». Материал был подготовлен в 2016 г. для специального выпуска журнала по исследованиям полярной ионосферы, но по административным обстоятельствам остался в портфеле редакции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, ГЛОНАСС, GPS, ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ, ИОНОСФЕРНАЯ ЗАДЕРЖКА, СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ, АВРОРАЛЬНЫЙ ОВАЛ, МОДЕЛЬ

DOI 10.5425/2304-7380_2022_35_49

<https://elibrary.ru/https://elibrary.ru/nwumwx>

1. ВВЕДЕНИЕ

Высокоширотная ионосфера и её авроральные овалы с ионосферной токовой струёй оказывают существенное влияние на качество радиосвязи, позиционирования по сигналам КА глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), безопасность энергетических, коммуникационных и транспортных систем [1, 2].

Для мониторинга высокоширотной ионосферы используются расположенные на суше и островах станции ионосферного зондирования, сеть магнитных обсерваторий и риометров, визуальные наблюдения за проявлением полярных сияний, системы РЛС, КА дистанционного зондирования Земли [3], радары, сигналы глобальных навигационных спутниковых систем [4]. Наблюдения ионосферы с судов носят экспедиционный характер, фрагментарны и нерегулярны.

Зондирование высокоширотной ионосферы, особенно в Российском секторе Арктики, с судов, в том числе ледового класса, реально, так как они оснащены навигационными приемниками сигналов КА ГНСС.

Электронная почта авторов для переписки:

Тертышников Александр Васильевич, e-mail: atert@mail.ru

Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru<https://elibrary.ru/nwumwx>

2. СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки возможности зондирования высокоширотной ионосферы по сигналам КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS с морских судов было проведено несколько экспедиций в 2013-2015 гг. в рамках проекта Арктического плавучего университета (АПУ) Северного (Арктического) федерального университета. В 2014-2015 гг. для экспедиций использовалось научно-исследовательское судно (НИС) «Профессор Молчанов», а в 2013 г. НИС «Академик Федоров». В экспериментах использовался геодезический навигационный приемник «Trimble 5700».

Метод зондирования ионосферы [4], предлагаемый для проведения эксперимента, отрабатывался на нагревном стенде "Сура" [7], на Байконуре [8], и стал основой технологии зондирования ионосферы, в которую вошли наработки технологий наклонного зондирования ионосферы, наземного и спутникового радиозондирования ионосферы, зондирования на основе сигналов навигационных спутниковых систем, томографии ионосферы, многочастотного зондирования с геостационарных космических аппаратов (ГКА) [5].

Основное внимание при зондировании уделялось расчету ПЭС в подионосферных точках видимых КА ГНСС. В высоких широтах это может позволить «просвечивать» зоны полярных сияний, аврорального овала и каспа. Географическое положение приемника определяет возможность зондирования морфологии холодной плазмы ближнего космоса над полярной шапкой Земли.

Для обработки полученных с приемника RINEX-файлов был разработан программно-аппаратный комплекс [9]. Его верификация и валидация проводились при сравнении с данными модели ионосферы IRI-2011 в ходе экспериментов в ФГБУ «ИПГ» (Москва).

3. ПРИМЕРЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ЗОНДИРОВАНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

Положение аврорального овала проявляется в широтном градиенте ионосферной задержки сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS, проходящих вблизи от маршрута судна. С помощью [9] по данным RINEX-файлов, получаемых с навигационного приемника на судне, рассчитывалось положение наблюдаемых с НИС треков НКА (фактически вдоль подионосферных точек НКА). Среди них отбирались треки, которые проходили вблизи меридиана НИС. Вдоль этих треков анализировались широтные градиенты изменения ионосферной задержки сигналов НКА GPS.

Пример широтного изменения полного содержания электронов (ПЭС) по широте под нисходящим треком НКА G10 показан на рис. 1.

Увеличение ПЭС на широтах 69,5-67,5 градусов в принципе соответствует морфологии аврорального овала в полночь по московскому времени и результатам моделирования положения центральной зоны аврорального овала по [6]. Поэтому можно предположить, что это увеличение и есть проявление аврорального овала.

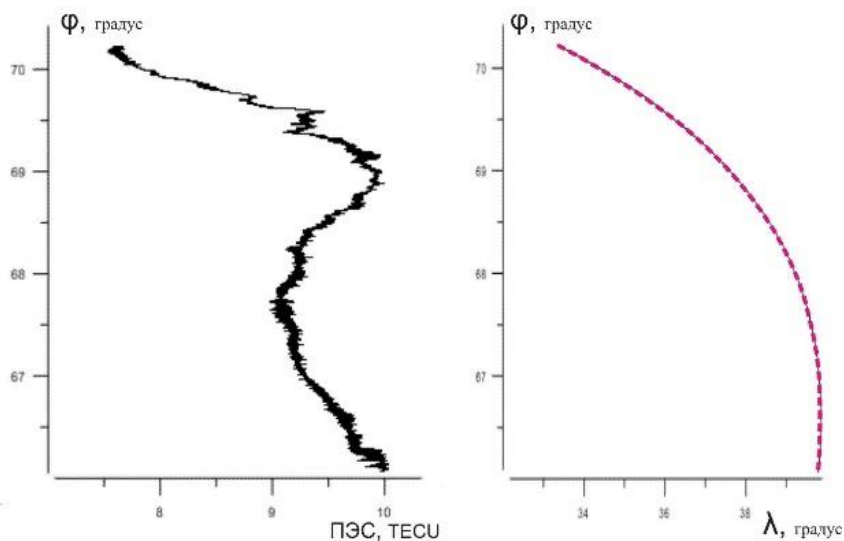
На б) – фрагменте рис. 1 представлен профиль распределения ионосферной задержки по широте для вечернего нисходящего трека НКА G10 с 19-00 до 22-21 с осреднением оценок ПЭС по предыдущим 5 минутам

Над средними широтами видно проявление ночного обеднения ионосферы. Аномальное увеличение ионосферной задержки на широтах 69-67 градусов может быть обусловлено ионосферной плазмой аврорального овала, возможностью существования ионосферной токовой струи [10], максимальной широтой надира КА GPS. Разница в положении градиентов ионосферной задержки могла быть обусловлена полуночным (на запад, рис. 1 а) и предутренним (над НИС, рис. 1 б) треками НКА.

Сложная морфология распределения ионосферной задержки была отмечена к магнитному полюсу Земли. ПЭС над магнитным полюсом во время экспериментов было пониженным. В зоне аврорального овала существенно возрастал поток сбоя выдачи данных на выходе навигационного приемника.

Геомагнитная обстановка во время экспериментов была спокойной. Кр-индекс по данным [11] для 03.08.2014 г. оценивался как 1+. Солнечная активность была низкая. Рассчитанные путем подбора значения AL-индекса для разного положения границ овала (рис. 2) соответствовали данным [12] с расшифровкой формата представления данных в [13]. В расчетах использовались данные о положении магнитных полюсов Земли по Международной геомагнитной опорной модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field).

а)



б)

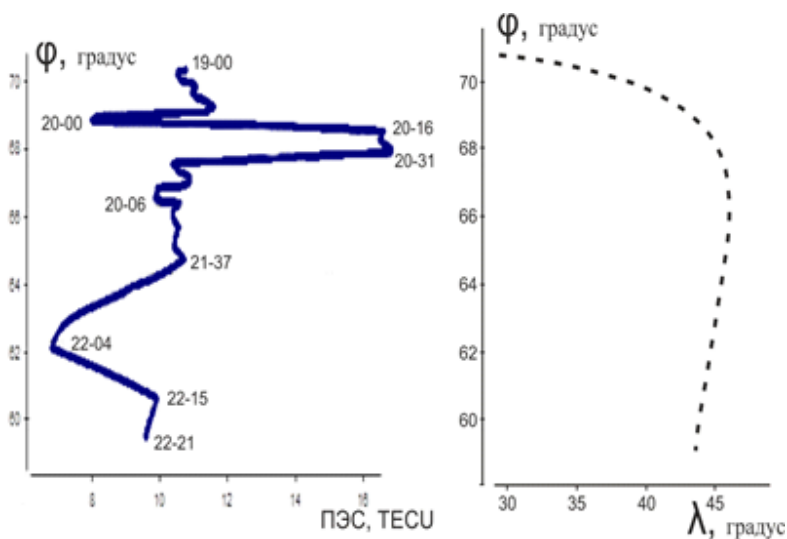


Рис. 1. Изменение ПЭС по широте. а) - левый фрагмент) на нисходящем треке НКА G10 (правый фрагмент) в период 0 ч 06 с – 1 ч 58 мин 13 с 03.08.2014 г. б) - левый фрагмент с временными метками) на нисходящем треке НКА G01 (правый фрагмент) 03.08.2014 г.

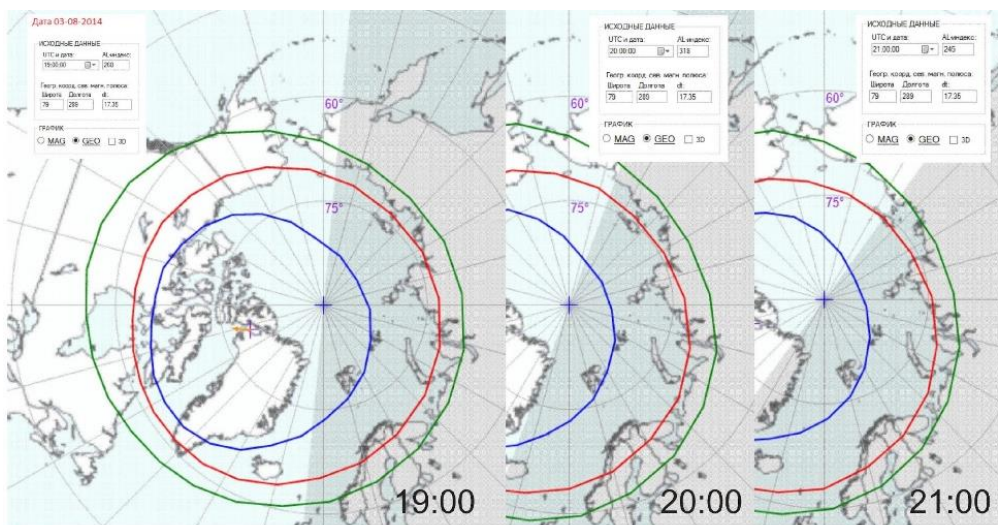


Рис. 2. Результаты оценивания AL-индекса, положения аврорального овала и магнитного полюса Земли на 19:00, 20:00 и 21:00 мск 03.08.2014 г.

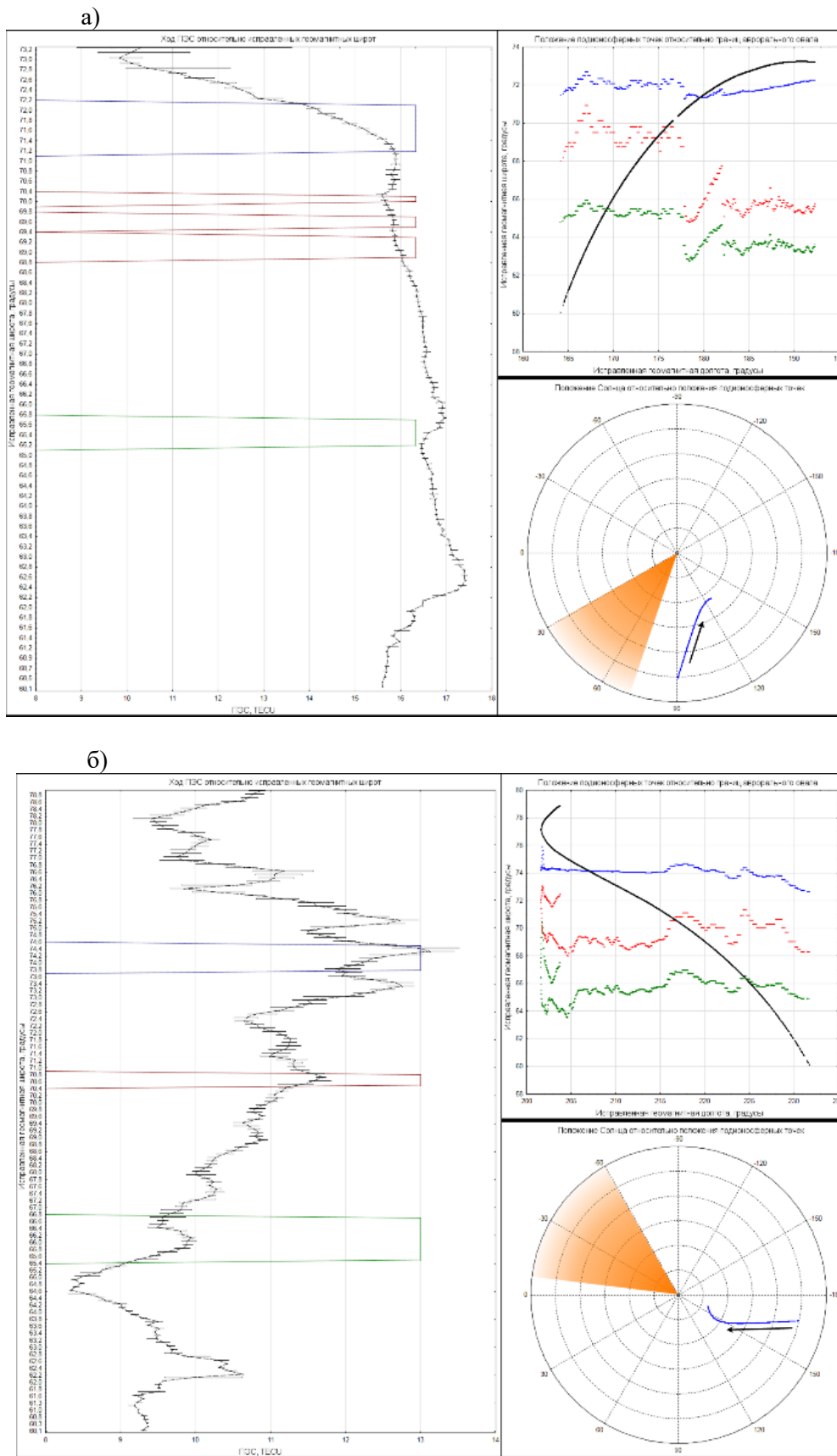


Рис. 3. Изменение ПЭС вдоль геомагнитной широты подионосферных точек КА GPS:
 а) G04 07:00 - 10:00 UTC 28.08.2013 г. б) G08 12:00 - 16:00 UTC 28.08.2013 г.

В результате обработки данных экспериментов было отмечено, что движение КА из дневной области ионосферы маскирует проявление в ПЭС экваториальной границы аврорального овала и границы его диффузного свечения. Подтвердилась также необходимость совершенствования климатической модели аврорального овала Г.В. Старкова для расчета ПЭС.

На рисунке 3 представлены графики изменения ПЭС вдоль проекции подионосферных точек без осреднения по времени вдоль геомагнитной широты (левая часть рисунка), а также области пересечения подионосферными точками границ аврорального овала, рассчитанных по модели Г.В. Старкова [16] с фактическими значениями AL-индекса. Данные были получены 28.08.2013 г с НИС «Академик Федоров».

Прямоугольниками обозначены пересечения подионосферными точками границ аврорального овала по модели Г.В. Старкова: синий – приполюсная граница, красный – экваториальная граница, зеленый – граница диффузного свечения.

На правом верхнем фрагменте представлено положение подионосферных точек (черная линия) относительно границ аврорального овала по модели Г.В. Старкова.

На правом нижнем фрагменте показано положение подионосферных точек (синяя линия) относительно положения солнца (оранжевый сектор), а также направление движения подионосферных точек (черная стрелка).

Границы аврорального овала на рис. 3б смещены севернее границ, рассчитанных по модели Г.В. Старкова, что может быть связано с установленной в расчетах высотой для расчета подионосферных точек.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены примеры зондирования положения аврорального овала с помощью геодезического навигационного приемника сигналов ГНСС на НИС «Академик Федоров» и «Профессор Молчанов».

Авроральный овал проявляется в широтном градиенте электронной концентрации, в соответствии с морфологией аврорального овала, в том числе по модели Г.В. Старкова.

Технология зондирования высокоширотной ионосферы и аврорального овала реализуема с труднодоступных высокоширотных станций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. РД 52.88-699-2008.
2. Тertyshnikov A.V. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений / <http://elibrary.ru/item.asp?id=21273666>
3. Тertyshnikov A.V., Лапшин В.Б., Сыроешкин А.В. и др. Магнитные индексы. Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013. 178 с.
4. Тertyshnikov A.V., Большаков В.О. Технология мониторинга ионосферы с помощью приемника сигналов навигационных КА GPS/ГЛОНАСС (GALILEO) // Информация и космос. 2010. Т. 1. С. 100-105.
5. Тertyshnikov A.V., Пулинец С.А. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации/ Патент, 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.
6. Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения//Геомагнетизм и аэрономия, 1994, т. 34, № 3. С. 80-86.
7. Тertyshnikov A.V., Суровцева 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.
8. Тertyshnikov A.V. Результаты эксперимента по диагностике состояния ионосферы над Байконуром по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS

- (<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=48/>).
9. Глухов Я.В. Программа расчета относительных значений полного электронного содержания по характеристикам ГНСС ГЛОНАСС/GPS/Galileo. – Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619293, ФИПС, 01.10.2013.
 10. Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения/Физика околоземного космического пространства. – Апатиты: ПГИ, 2000.
 11. <http://www.celestrak.com/SpaceData/>
 12. http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp//dstae//wwwtmp/WWW_dstae00032678.dat
 13. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/format/aeformat.html>
 14. Тertyshnikov A.B. и др. Способ определения положения эпицентральной зоны источника и скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений. Заявка на изобретение. ФГБУ «ФИПС», Рег. № 2014125712/07(041820) от 25.06.2014.

EXAMPLES OF THE AURORAL OVAL MANIFESTATION DURING RADIO ILLUMINATION OF THE IONOSPHERE BY GNSS SPACECRAFT SIGNALS IN EXPERIMENTS AT THE NIS "PROFESSOR MOLCHANOV" AND "ACADEMIC FEDOROV"

A.V. Tertyshnikov, Ya.V. Glukhov

The results of probing traces of the auroral oval by GNSS GLONASS/GPS signals during experiments on probing the high-latitude ionosphere from the research vessels "Academic Fedorov" and "Professor Molchanov" are presented. The material was prepared in 2016, but due to administrative circumstances it was in the editorial portfolio.

KEYWORDS: IONOSPHERE, GLONASS, GPS, POSITIONING, IONOSPHERIC DELAY, ELECTRON CONTENT, AURORAL OVAL, MODEL