

### **Координаты магнитного полюса Земли в расчетах положения аврорального овала по сигналам ГНСС**

А.В. Тертышников<sup>1</sup>, В.М. Смирнов<sup>1</sup>, О.В. Юшкова<sup>1</sup>, В.В. Удриш<sup>2</sup>, Д.С. Ковалев<sup>3</sup>, Ю.В. Писанко<sup>1</sup>, А.А. Палей<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова Российской академии наук, 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. акад.Введенского, д.1,

<sup>2</sup>Минобороны Российской Федерации, 119160, Москва, Фрунзенская наб., д. 22/2.  
[atert@mail.ru](mailto:atert@mail.ru),

<sup>3</sup>Северный (Арктический) Федеральный университет (Архангельск), [dimkinkov@mail.ru](mailto:dimkinkov@mail.ru)

*Представлены примеры диагностики положения аврорального овала по сигналам КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS. Эксперименты проводились в экспедициях Арктического плавучего университета (АПУ) Северного (Арктического) федерального университета с помощью приемника, установленного на научно-исследовательском судне (НИС) «Профессор Молчанов». В расчетах использовалась модель аврорального овала Г.В. Старкова. На основе полученных результатов рассмотрена возможность диагностики смещений положения магнитного полюса по длительным наблюдениям за положением аврорального овала по сигналам КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS.*

*Examples of diagnostics of position of the auroral oval signals KA GNSS GLONASS/GPS are presented. The experiments were carried out in expeditions of the Arctic floating University, Northern (Arctic) Federal University with the help of a receiver mounted on the research vessel "Professor Molchanov". The calculations were based on a model of the auroral oval G. V. Starkov. On the basis of obtained results the possibility of diagnosis of displacements of the position of the magnetic poles long-term observations of the position of the auroral oval signals GNSS GLONASS/GPS are discussed.*

По данным обработки многолетних наземных наблюдений за положением полярных сияний в [1] представлена аналитическая модель климатических границ аврорального овала с погрешностью расчета характерных границ аврорального овала (приполюсной границы, экваториальной и границы диффузного свечения) порядка двух градусов широты. Авроральный овал ограничивает область высокоширотной ионосферы, которая называется полярной шапкой.

Положение аврорального овала соответствует проекции авроральной магнитосферы на границу атмосферы и проявляется в зоне активных полярных сияний [1, 2] и токовых струй (электроджетов) силой в миллионы ампер при изменениях в магнитосферной токовой цепи.

В модели аврорального овала Г.В. Старкова [1] не предусмотрена детализация его морфологии и требуется задание координат магнитного полюса Земли, AL-индекса магнитной активности, который рассчитывается по данным наблюдений за состоянием магнитного поля Земли на сети магнитометрических обсерваторий. В случае задания координат магнитного полюса приходится использовать зарубежные данные, которые требуют верификации.

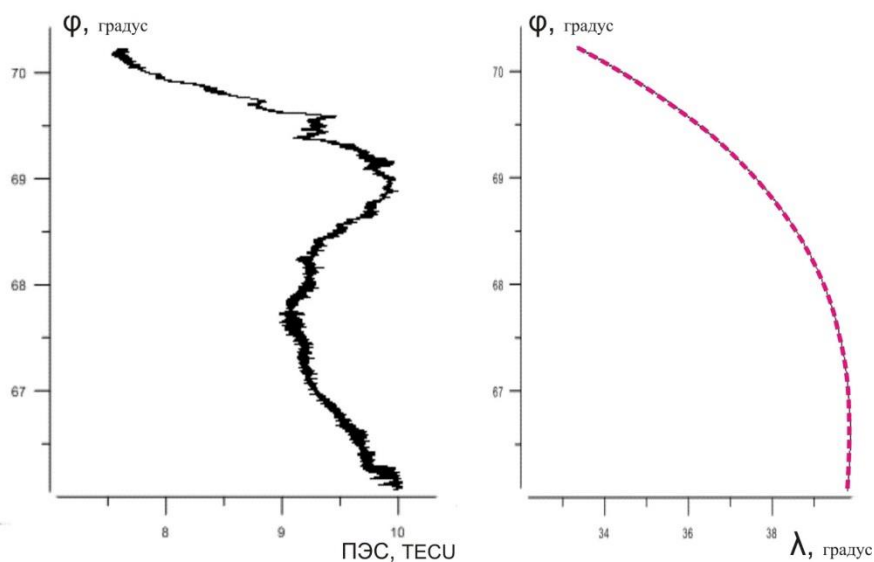
В поиске информационных ресурсов для решения этого вопроса и для повышения оперативности получения необходимых данных проводились эксперименты по зондированию высокоширотной ионосферы по сигналам по сигналам космических аппаратов глобальных навигационных спутниковых систем (КА ГНСС) ГЛОНАСС/GPS с ледоколов и морских судов ледового класса. Морфология полярной

ионосферы и ее аврорального овала обусловлена магнитным полем Земли.

По результатам экспериментов выявлена возможность зондирования положения аврорального овала [3, 4]. Он проявляется в локальном экстремуме распределения широтных градиентов электронной концентрации. Измерения проводились в экспедициях Арктического плавучего университета (АПУ) Северного (Арктического) федерального университета с помощью приемника, установленного на научно-исследовательском судне (НИС) «Профессор Молчанов». В расчетах положения аврорального овала использовались данные вдоль траекторий НКА вблизи магнитного меридиана навигационного приемника.

С помощью [5, 6] по данным RINEX-файлов, получаемых с навигационного приемника на судне, рассчитывалось положение наблюдаемых с НИС треков навигационных КА (фактически подионосферных точек). Среди них отбирались треки, которые проходили вблизи меридиана НИС. Вдоль отобранных 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.



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

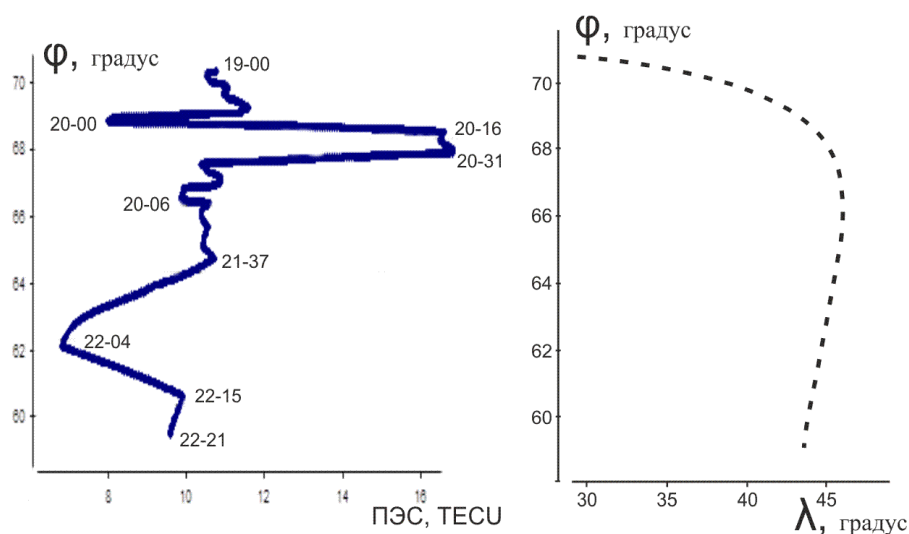
Увеличение ПЭС на широтах 69,5-67,5 градусов, в принципе, соответствует морфологии аврорального овала в полночь по московскому времени и результатам моделирования положения центральной зоны аврорального овала по [1]. Поэтому можно предположить, что это увеличение и есть проявление аврорального овала.

На рис. 2 представлен профиль распределения ионосферной задержки по широте для вечернего нисходящего трека навигационного КА G10 с 19-00 до 22-21 с осреднением оценок ПЭС по предыдущим 5 минутам.

Резкие широтные градиенты в распределении ионосферной задержки на рис 2 оказываются резче. Над средними широтами видно проявление ночного обеднения ионосферы.

Аномальное увеличение ионосферной задержки на широтах 69-67 градусов может быть обусловлено распределением ионосферной плазмы в авроральном овале, возможностью существования ионосферной токовой струи, максимальной широтой

надира КА GPS. Разница в положении градиентов ионосферной задержки с рис. 2 могла быть обусловлена полуночным (на запад, рис. 1) и предутренним (над НИС, рис. 2) треками навигационного КА, но вряд ли обусловлены временной разницей в излучении сигналов на рабочих частотах ГНСС.



**Рис. 2. Изменение ПЭС по широте (левый фрагмент с временными метками) на нисходящем треке НКА G01 (правый фрагмент) 03.08.2014 г.**

Достаточно сложные широтные распределения градиентов ПЭС были получены и для ряда треков других навигационных КА. При их анализе учитывалось, что ширина аврорального овала зависит от времени суток. Широтное распределение ионосферной задержки иногда имело двухмодовый характер, что характерно для ночного аврорального овала. Сложная морфология распределения пониженной ионосферной задержки была отмечена над полюсом.

В результате расчетов было отмечено, что в зоне аврорального овала существенно возрос поток сбоев выдачи данных на выходе навигационного приемника. Возникновение сбоев и отказов навигационной аппаратуры анализировалось также в связи с установкой антенны у борта судна и возможным экранировании сигналов группировки навигационных КА ГНСС надстройками судна. Этим частично объяснялись причины некоторых сбоев в приеме сигналов ГНСС GPS, а также случаи отсутствия эффектов проявления аврорального овала, особенно на восходящих треках навигационных КА.

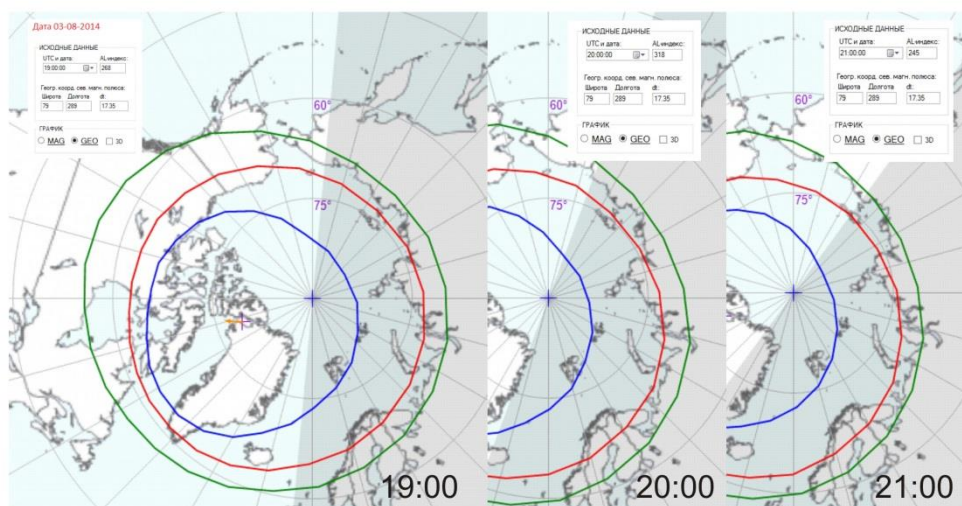
Геомагнитная обстановка во время экспериментов была спокойной. Кр-индекс по данным [7, 8] для 3.08.2014 г. оценивался в 1+. Солнечная активность низкая [9]. Рассчитанные путем подбора значения AL-индекса (рис. 3) соответствовали данным [10] с расшифровкой формата представления данных в [11], что позволило использовать в качестве первого приближения положения магнитных полюсов Земли [12] и оценки по климатической модели аврорального овала, в которой фактически использованы данные наблюдений сети магнитных обсерваторий.

ПЭС над магнитным полюсом во время экспериментов было пониженным.

Зеленая линия – граница диффузного свечения, красная линия – экваториальная граница аврорального овала, синяя линия – приполюсная граница аврорального овала. Затемнение части рисунка проходит по границе день-ночь. Над Гренландией отмечено положение магнитного полюса Земли в 1987 г.

При наличии других данных, например вертикальных профилей заряженных

частиц, радиотомографических разрезов ионосферы по меридиональной цепочке пунктов приема сигналов ГНСС, данных ПЭС с сети наблюдений в приавроральной зоне и т.д., есть возможность уточнять положение аврорального овала и состояние магнитного поля Земли.



**Рис. 3. Примеры результатов расчетов по оцениванию AL-индекса, положения аврорального овала и магнитного полюса Земли на 19:00, 20:00 и 21:00 мск 03.08.2014 г.**

Полученные результаты зондирования высокоширотной ионосферы могут использоваться для решения прикладных и обратных задач. Среди них представляет интерес зондирование холодной плазмы над зонами каспа и магнитного полюса Земли, а также диагностика его положения и геомагнитной активности.

Медленные многолетние смещения магнитных полюсов проявляются в изменении климатических границ авроральных овалов Земли над Арктикой и Антарктикой. При наличии длительных рядов наблюдений можно, решая обратную задачу диагностики положения аврорального овала, следить за смещением положения магнитных полюсов Земли и за качеством зарубежных данных о координатах магнитного полюса.

Реализация технологии зондирования аврорального овала по сигналам ГНСС позволит повысить оперативность, точность и надежность мониторинга зон аврорального овала, магнитной активности и положения магнитных полюсов Земли по зондируемым и рассчитываемым характеристикам высокоширотной ионосферы на основе приема сигналов с навигационных КА ГНСС и геостационарных КА и с учетом климатических данных об авроральном овале и магнитного поля Земли. Для этого необходимо расположение приемника или нескольких приемников в зоне полярной шапки и аврорального овала Арктики и/или Антарктики, выбором нескольких навигационных КА с отрезками траекторий, близких к магнитному меридиану каждого приемника, приемом и обработкой сигналов навигационных КА, подионосферные точки которых проходят через область аврорального овала.

Расчет состояния магнитного поля Земли заключается в подборе индексов магнитной активности, которые позволяют достичь наибольшего соответствия выявленных широт аврорального овала для каждого цикла зондирования с КА прогнозным широтам, рассчитываемым по климатической модели аврорального овала.

В расчетах целесообразно использовать метод последовательных приближений индексов магнитной активности, которые позволяют достичь наибольшего соответствия (по минимуму среднеквадратического отклонения) рассчитанных климатических границ аврорального овала и границ аврорального овала, полученных для каждого цикла зондирования.

Зафиксированное на достаточно протяженном (годы) временном отрезке наблюдений по сети приемников отклонение границ овала от климатических границ может приниматься как следствие изменений состояния магнитного поля Земли. По климатической адаптируемой модели магнитного поля Земли можно рассчитать эти изменения, а по многолетним данным наблюдений медленные смещения положения магнитных полюсов Земли и их прогнозные положение.

Архивы результатов мониторинга высокоширотной ионосферы необходимо использовать для коррекции адаптивных моделей аврорального овала, полярной ионосферы и состояния магнитного поля Земли с индексами магнитной активности.

### Литература

1. Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения//Геоматизм и аэрономия, 1994, т. 34, № 3. С. 80-86.
2. Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения/Физика околоземного космического пространства. – Апатиты: ПГИ, 2000.
3. Тертышников А.В. Технология зондирования положения ионосферного овала и морфологии высокоширотной ионосферы по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. // Гелиогеофизические исследования, 2015а (<http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=304>);
4. Тертышников А.В., Способ определения положения аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Решение РОСПАТЕНТа от 19.07.2016 г. о выдаче патента на изобретение по заявке № 2015126532/28(041268) от 02.07.2015 г. 2016б.
5. Тертышников А.В., 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. 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.
7. Тертышников А.В. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений / <http://elibrary.ru/item.asp?id=21273666>.
8. Тертышников А.В., Сыроешкин А.В. и др. Магнитные индексы. Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013. 178 с.
9. <http://www.celestrak.com/SpaceData/>.
10. [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp//dstae///wwwtmp/WWW\\_dstae00032678.dat](http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp//dstae///wwwtmp/WWW_dstae00032678.dat).
11. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/format/aeformat.html>.
12. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>