



УДК 550.8.054

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА НАД АНТАРКТИДОЙ СИГНАЛАМИ ГНСС С САННО-ГУСЕНИЧНОГО ПОЕЗДА К РОССИЙСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ «ВОСТОК»

А.В. Тertyшников<sup>1</sup><sup>1</sup>Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, г. Москва, Россия

По программе 60-й Российской Антарктической экспедиции сезона 2014–2015 г.г. в ходе санно-гусеничного перехода по Антарктиде к станции «Восток» 8-19.01.2015 г. проводился эксперимент по приему сигналов КА Глобальных навигационных спутниковых систем (КА ГНСС) ГЛОНАСС/GPS.

Обсуждаются технология зондирования на основе метода радиопросвечивания и критерии диагностики аврорального овала в полном электронном содержании ионосферы (ПЭС).

В результатах радиопросвечивания высокоширотной ионосферы выявлены следы аврорального овала в широтном распределении ионосферных задержек сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS. Приведен пример проявления следов аврорального овала. Рассчитан маршрут перехода. Сравнение полученных результатов проведено с результатами моделирования аврорального овала по модели SIMP2 и данными с официальной интернет-страницы эксперимента. Показана необходимость создания модели аврорального овала по ПЭС.

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

**DOI:** 10.54252/2304-7380\_2021\_30\_35

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Важнейшим морфологическим элементом высокоширотной ионосферы является авроральный овал, который находится вблизи границы полярной шапки и представляет область ионосферы, являющейся проекцией плазменного слоя и каспа вдоль силовых линий геомагнитного поля, где наиболее часто наблюдаются полярные сияния [1]. В зоне аврорального овала увеличивается повторяемость сбоев и отказов радиосвязи и навигационной аппаратуры. В Арктике авроральный овал «висит» над Северным морским путем.

Источником электронов и ионов аврорального овала являются потоки плазмы из хвоста магнитосферы. Дневная часть овала обычно совпадает с областью высыпаний электронов (с энергией обычно в 100-300 эВ) граничного плазменного слоя, проекция которого на ионосферу находится на большей широте, чем для связываемых с активными формами полярных сияний электронов (с энергией до 10 КэВ) центрального плазменного слоя [2, 3].

Для контроля высокоширотной ионосферы и зон авроральных овалов используются наземные и космические технологии зондирования. Известный мегапроект SuperDARN предназначен для контроля системы глобальной конвекции в высокоширотной ионосфере и в зоне авроральных овалов в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях [4]. Он объединяет сеть наземных ВЧ-радаров с

секторами обзора на полярные шапки Арктики и Антарктики, что подтверждает большое внимание к мониторингу полярной ионосферы.

Характеристики положения авроральных овалов по результатам моделирования представлены в [5, 6]. В качестве инструмента зондирования полярной ионосферы в [7, 8] использована технология радиопросвечивания сигналами Глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС. Представление о сетях стационарных приёмников сигналов космических аппаратов (КА) Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), используемых в зарубежных исследованиях полярных шапок Земли, даст рис. 1.

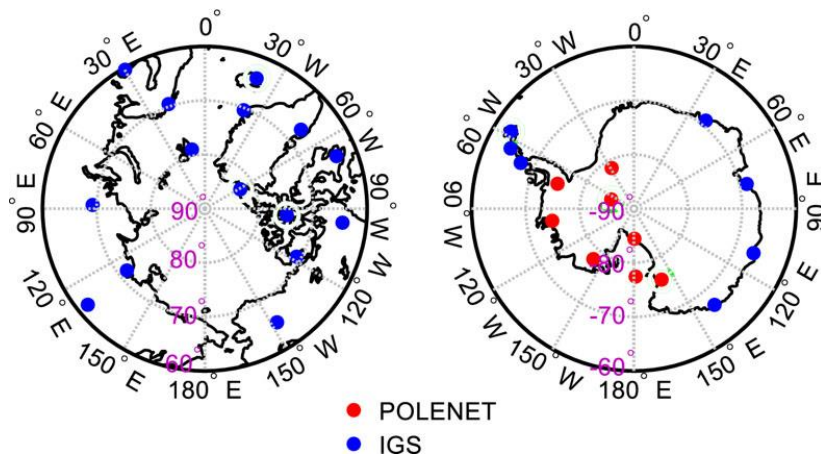


Рис. 1. Положение навигационных приёмников, использованных в [9] для исследования полярной ионосферы.

Стационарные приёмники в Антарктиде они связаны в сеть “POLENET” [9]. Данные с приёмников в Арктике, отмеченных на рис. 1 синими кружками, хранятся на сайте IGS.

Суровые климатические условия обуславливают целесообразность использования для зондирования высокоширотной ионосферы подвижных пунктов зондирования [8]. Не только на кораблях, но и транспортируемых по льду. Именно такой вариант был реализован в ходе санно-гусеничного перехода по Антарктиде от Российской антарктической станции «Прогресс» к материковой станции «Восток» [10] 8-19.01.2015 г. с помощью приёмника («JAVAD») сигналов ГНСС. Эксперимент проводился вне рамок программы 60-й Российской антарктической экспедиции 2014-2015 г.г.

В эксперименте проводилось зондирование ионосферных задержек сигналов ГНСС, в том числе по отдельным трассам КА ГНСС, пересекающих зону аврорального овала. По пути почти к центру южного аврорального овала удалось получить данные о состоянии южной полярной ионосферы и эффектах проявления следов зоны аврорального овала в ПЭС над Антарктидой.

## 2. ОСОБЕННОСТИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Основное внимание в эксперименте по зондированию ионосферы над Антарктидой уделялось расчёту ПЭС в подионосферных точках «видимых» приемником КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS. Данные зондирования ионосферных задержек сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS обрабатывались методом зондирования ионосферы и геодвижений, который представлен в [11]. При этом учитывались особенности морфологии высокоширотной ионосферы [12], увеличение мелкомасштабных неоднородностей в зоне аврорального овала, отмеченное в экспериментах в Арктике [3].

Из-за неоднородностей ионосферы, размеры которых сравнимы с длиной проходящих через них радиоволн, возможно нарушение канонического предположения, используемого при формализации закономерностей распространения радиоволн, сбое приёма, замирания и мерцания радиосигналов, ошибки позиционирования [3]. Для сигналов ГНСС в областях высокоширотной ионосферы с повышенным содержанием неоднородностей происходит переотражение, и траектория радиосигналов на более коротких длинах волн может превысить длину траектории на первых рабочих

частотах ГНСС. Следствием этого могут стать отрицательные оценки относительного ПЭС, рассчитываемые традиционным дифференциальным способом [7] для предположения о сферически-симметричном распределении параметров ионосферы.

В этой ситуации для уменьшения помех в принимаемых сигналах ГНСС и для диагностики морфоструктурных особенностей высокоширотной ионосферы использовался анализ модуля рассчитанных оценок относительных значений ПЭС вдоль меридианов. Предполагалось, что зона аврорального овала может характеризоваться повышенным значением модуля относительного ПЭС в узком диапазоне широт. Нечёткость подобного представления аврорального овала связана с зонами терминатора и в направлении в хвост магнитосферы и на Солнце. В этих зонах отмечается повышение сбоев в принимаемых сигналах ГНСС [3].

Разработанная информационная технология для обработки полученных с навигационного приемника данных, конвертированных в формат RINEX-файлов, прошла верификацию и валидацию в ряде экспериментов в различных климатических условиях. Инструментальные поправки для определения ПЭС по каждому КА ГНСС были рассчитаны при сравнении с данными модели ионосферы IRI-2011 на базе ФГБУ ИПГ. В связи с ограничениями на оперативное получение данных с навигационных приемников, в перечень требований к информационной технологии вошли:

1. Возможность обработки данных RINEX-файлов в большом объеме вне зависимости от количества файлов наблюдений одной станции за одни сутки;
2. Обработка неполных и «битых» наблюдений;
3. Предоставление данных о вариациях ПЭС при отсутствии возможности или необходимости калибровки приемника;
4. Возможность определения координат приемника для каждого момента времени наблюдений.

Программная обработка суточного файла наблюдений с одного приемника с частотой опроса 1 Гц заняла на современных ПЭВМ до 15-40 минут. При этом генерировалось до полутора миллионов строк данных. Современные ПЭВМ позволяют одновременно обрабатывать до 15 суток наблюдений.

Экспертиза технологии была проведена не только в многочисленных экспериментах в различных климатических условиях, но и в ФГБУ ФИПС, где была подтверждена ее новизна и промышленная применимость.

Для проводимого эксперимента радиопросвечивания ионосферы над Антарктидой необходимы данные о положении аврорального овала. Если для аврорального овала над Арктикой имеются климатические модели границ: центральной (экваториальной) части, приполюсной границы, а к средним широтам – границы диффузных сияний, эти границы связаны с различными энергиями высыпающихся частиц радиационных поясов Земли, то для южного аврорального овала можно использовать результаты моделирования критической частоты Е-слоя ионосферы по модели SIMP2 [5]. В них достаточно очевидно проявляется положение аврорального овала (рис. 2), что может использоваться в качестве ориентира при поиске эффектов проявления аврорального овала по сигналам ГНСС.

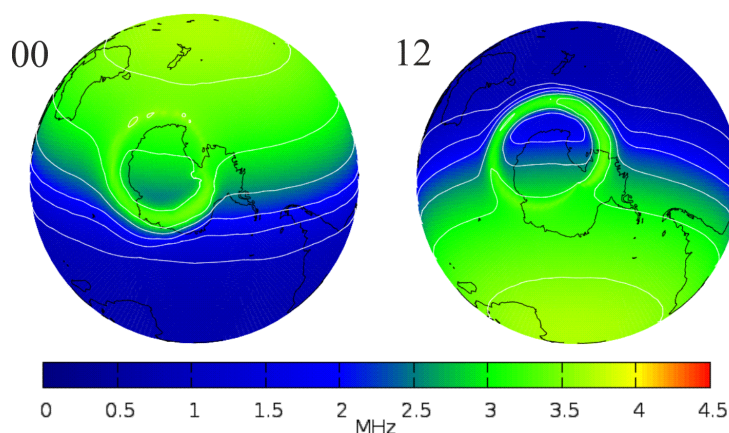


Рис. 2. Результаты моделирования критической частоты Е-слоя ионосферы 17.01.2015 г. для 00:00 UT и 12:00 UT по модели SIMP2 [5].

Смещение зоны повышенной концентрации Е-слоя в авроральном овале связано с положением Солнца. Это отмечено в планетарной динамике аврорального свечения над Арктикой [6]. Однако проявления аврорального овала в рассчитанных по модели SIMP2 [5] распределениях ПЭС нет, что физически может объясняться особенностями вертикального распределения электронной концентрации выше Е-слоя высокоширотной ионосферы. Но в морских экспериментах в Арктике в 2011-2015 г.г. для северного аврорального овала, это не подтвердилось [3]. Следы аврорального овала достаточно уверенно диагностировались по характеристикам сигналов отдельных КА ГНСС.

Особенностью зондирования аврорального овала из полярной шапки обусловлена тем, что его положение связано с магнитным полем Земли [3]. Поэтому при выборе треков подионосферных точек КА ГНСС для зондирования широтных градиентов ПЭС в высокоширотной ионосфере с целью диагностики зоны аврорального овала необходимо учитывать не совпадение географических и магнитных полюсов [13]. Селекция орбит КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS вблизи магнитного меридиана положения навигационного приемника и с учетом суточной эволюции ионосферных параметров может повысить четкость проявления признаков аврорального овала.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЗОНДИРОВАНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА НАД АНТАРКТИДОЙ

Для расчета траектории движения санно-гусеничного перехода использовались все наблюдаемые КА ГНСС. Полученные с дискретностью 10 секунд оценки псевдопозиционирования осреднялись по каждому суткам перехода. Рассчитанный маршрут представлен на рис. 3.

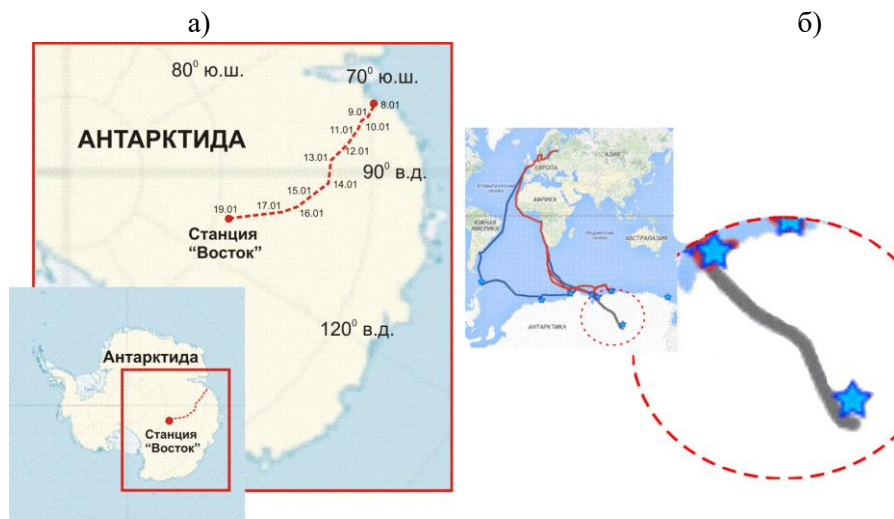


Рис. 3. Среднесуточное положение санно-гусеничного перехода к станции «Восток» 08-19.01.2015 г.: а) рассчитанный по сигналам ГНСС, б) маршрут 60 РАЭ с официальной страницы эксперимента [10] с увеличенным фрагментом санно-гусеничного перехода.

Отклонения от отрезка, соединяющего начальную и конечную точки маршрута, соответствуют заявленному в [10] маршруту санно-гусеничного перехода.

Положение наблюдаемых треков КА ГНСС рассчитывалось с помощью [11, 14]. Для примера на рис. 4 представлено положение рассчитанных треков подионосферных точек видимых в течение 17.01.2015 г. КА ГНСС.

По расположению треков видно, что экранировок приемной антенны навигационного приемника не было.

Изменение ПЭС по широте вдоль проекции подионосферных точек пересекавшего авроральный овал навигационного КА GPS G14 17.01.2015 г. представлено на рис. 5.



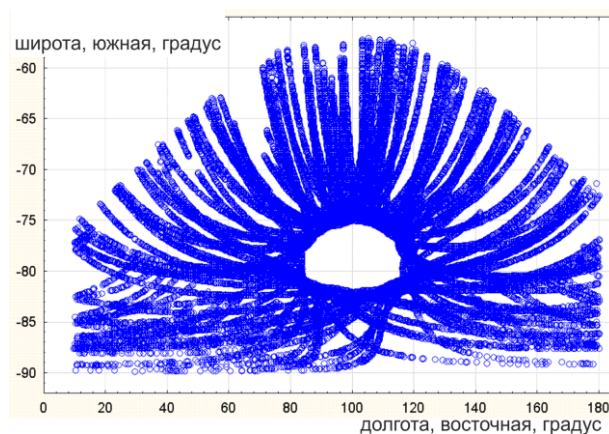


Рис. 4. Положение треков подионосферных точек видимых 17.01.2015 г. КА GPS.

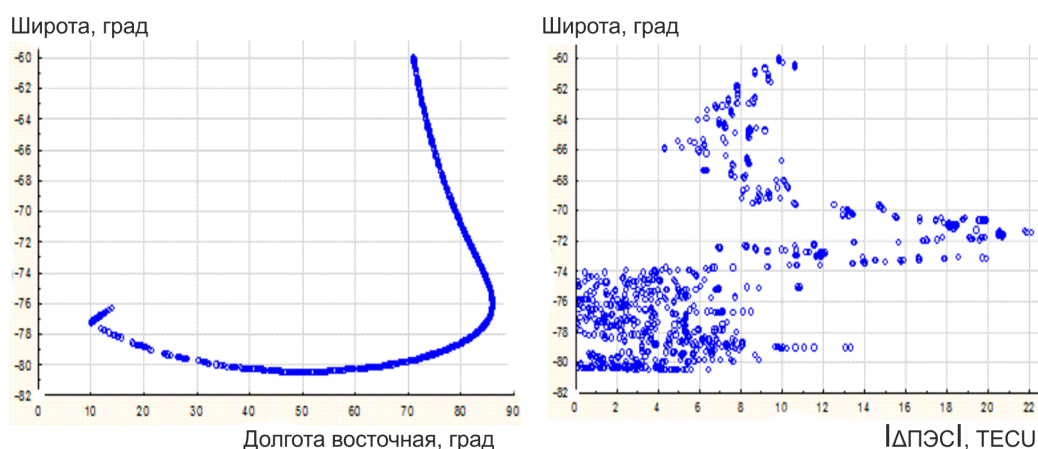


Рис. 5. Изменение ПЭС по широте вдоль подионосферных точек КА G14 (00:55 - 05:42 UT 17.01.2015 г.).

При пересечении КА GPS G14 диапазона широт 72-73 град. ю. ш., наблюдается резкое изменение модуля ПЭС. Аналогичные эффекты фиксировались в зоне арктического аврорального овала [3]. Согласие зоны локального экстремума значений ПЭС по G14 на рис. 5 с результатами моделирования Е-слоя ионосферы по модели SIMP2 (65-68 град. ю. ш. на ~ 80 град. в.д.) можно считать удовлетворительным. Геомагнитная обстановка 17.01.2015 г., как и в течение всего перехода, была спокойной.

Для другого временного отрезка и восточнее, а также во второй половине суток, результаты проявления аврорального овала в широтном распределении ионосферных задержек сигналов навигационных КА GPS G03 и G20 представлены на рис. 6.

Здесь также есть различие в широте положения локального экстремума значений ПЭС порядка 5 градусов с результатами моделирования медианы Е-слоя ионосферы по модели SIMP2. Для КА G20 в изменении ПЭС по широте следует отметить второй пик около 69 градусов южной широты. Скорее всего, это проявление сложной структуры ночного аврорального овала. Многомодовое распределение ПЭС по широте в зоне аврорального овала фиксировалось по сигналам другим КА ГНСС, в том числе в арктических морских экспериментах [8].

Учитывая отсутствие адекватных моделей ПЭС в авроральном овале, его положение 17.01.2015 г. над Антарктидой в секторе меридианов 60-110 градусов восточной долготы можно ассоциировать с повышенным ПЭС на 69-73 градусах южной широты. Следует напомнить, что авроральный овал не просматривается в результатах расчетов ПЭС по модели SIMP2 над южной полярной шапкой.

Один из вариантов осреднения данных наблюдений значений модуля ПЭС в южной полярной шапке по всем видимым КА GPS за первую четверть суток 17.01.2015 г. представлен на рис. 7. При осреднении результатов зондирования и расчете поля ПЭС использован весовой пятиточечный фильтр Хемминга. В левом нижнем углу находится Южный географический полюс.

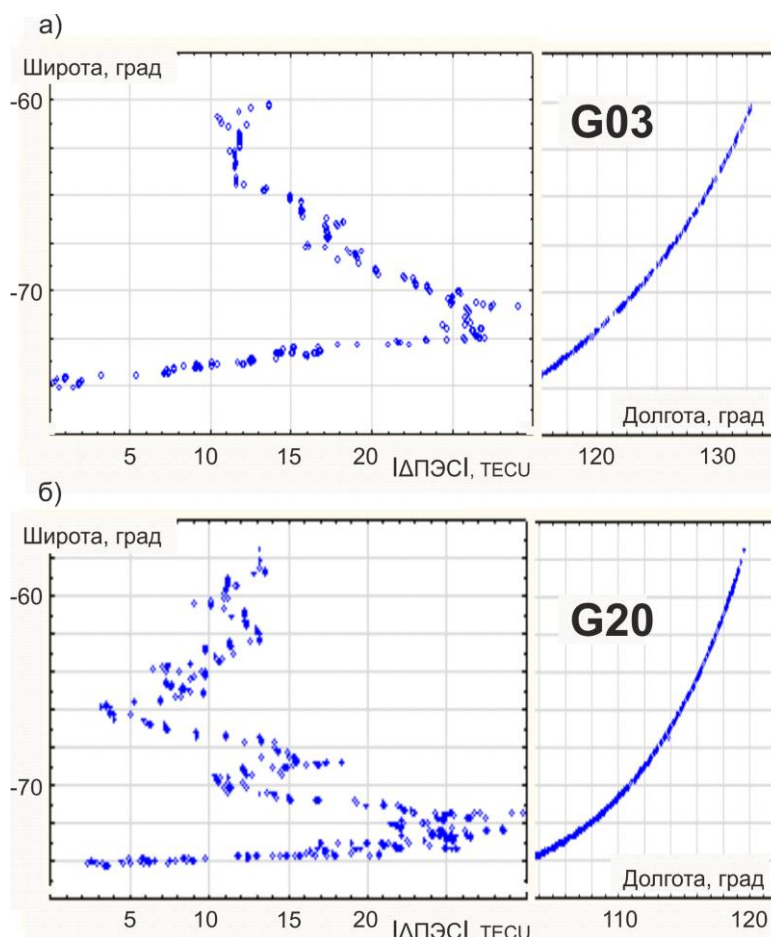


Рис. 6. Изменение ПЭС по широте вдоль треков подионосферных точек КА:  
а) G04 (18:00 - 19:00 UT) и б) G20 (18:00 - 20:12 UT) 17.01.2015 г.

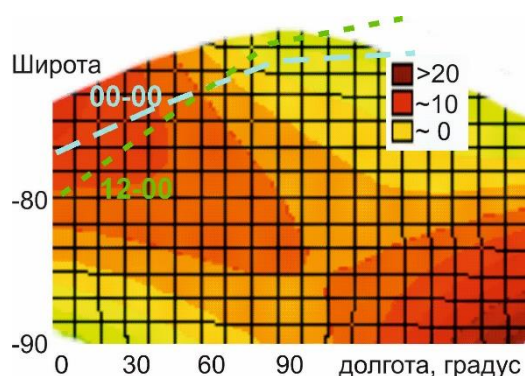


Рис. 7. Восстановленное поле относительного ПЭС для 00-06 UT 17.01.2015 г.  
Штриховые линии – положение медианы Е-слоя ионосферы по модели SIMP2 для двух моментов времени: 00 и 12 UT.

Интерпретация зон повышенных значений относительных ПЭС на рис. 7 предполагает учет морфологии полярной ионосферы и таких ее элементов, как ионосферный провал, зон конвекции и каспа, использование статистической модели конвекции в полярной шапке в [4].

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе санно-гусеничного перехода 60-й Российской Антарктической экспедиции к станции «Восток» 8-19.01.2015 г. методом радиопросвечивания по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS проведено зондирование ионосферы южной полярной шапки.

Расшифрован маршрут санно-гусеничного перехода по Антарктиде.

Зона антарктического аврорального овала проявилась в широтном градиенте ПЭС, в соответствии с морфологией аврорального овала с ошибкой около 5 градусов, относительно результатов моделирования положения медианы Е-слоя ионосферы по модели SIMP2.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Tertyshnikov A V (2019) A method for determining the characteristics of the auroral oval and the state of the Earth's magnetic field. Patent RU 2683113 C1. Available from: <https://patenton.ru/patent/RU2683113C1>.
2. Лазутин Л.Л. Овал полярных сияний – прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика. 2014. Т. 1. № 1. С. 23-35. DOI: 10.12737/5673.
3. Тertyshnikov A.B. 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.
4. <http://superdarn.thayer.dartmouth.edu/>
5. Модель СИМП. // <http://space-weather.ru/index.php?page=raschet-sostoyaniya-ionosfery-po-modeli-simp>.
6. Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения // Физика околоземного космического пространства. Апатиты: ПГИ, 2000. Т. 3. С. 409–499.
7. Тertyshnikov A.B. Технология зондирования положения ионосферного овала и морфологии высокоширотной ионосферы по сигналам глобальных навигационных спутниковых систем. // Гелиогеофизические исследования, 2015, <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=304>;
8. Тertyshnikov A.B., Чукин В.В., Глухов Я.В., Ковалев Д.С. Эксперименты по исследованию ионосферы с Арктического плавучего университета // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 41. С.156-164.
9. Hu Jiang, Jingbin Liu, Zemin Wang, Jiachun An, Jikun Ou, Shulun Liu, Ningbo Wang Assessment of spatial and temporal TEC variations derived from ionospheric models over the polar regions // Journal of Geodesy, 2018, PP. 1-17. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-018-1175-6>.
10. [https://www.glonass-iac.ru/aboutIAC/the\\_south\\_sea\\_route\\_in\\_2014\\_real\\_time.php](https://www.glonass-iac.ru/aboutIAC/the_south_sea_route_in_2014_real_time.php).
11. Тertyshnikov A.B., 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.
12. Исаев С.И. Морфология полярных сияний. – Л.: Наука, 1968. 167 с.
13. <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/GeomagneticPoles.shtml>
14. 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.

**RESULTS OF RADIO ILLUMINATION OF THE AURORAL OVAL OVER ANTARCTICA, GNSS SIGNALS FROM A SLED-TRACKED TRAIN CLOSER TO THE RUSSIAN ANTARCTIC STATION VOSTOK**

A. V. Tertyshnikov

According to the program of the 60th Russian Antarctic expedition season 2014-2015, during the sledge-crawler crossing of Antarctica from Vostok station on 8-19.01. 2015, an experiment was conducted to receive signals FROM Global navigation satellite systems (KA GNSS) GLONASS/GPS.

The technology of sounding based on radio illumination methods and criteria for diagnostics of the auroral oval in the full electronic content of the ionosphere (TEC) are discussed.

The results of radio illumination of the high-latitude ionosphere revealed traces of an auroral oval in the latitudinal distribution of ionospheric delays of KA GNSS GLONASS / GPS signals. An example of the appearance of traces of an auroral oval is given. The transition route is calculated.

Alignment of the obtained results was performed with the results of modeling the auroral oval using the SIMP2 model and data from the official Internet page of the experiment.

The necessity of creating models of the auroral oval by TEC is shown.

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