УДК 550.8.054

ПРОЯВЛЕНИЕ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА НАД АНТАРКТИДОЙ В ХАРАКТЕРИСТИКАХ СИГНАЛОВ ГНСС 17.01.2015 Г. ВБЛИЗИ СТАНЦИИ «ВОСТОК»

А.В. Тертышников

Поступила в редакцию 31. 01. 2016 г

В ходе санно-гусеничного перехода по Антарктиде к станции «Восток» 08.01–19.01.2015 г. по программе 60-й Российской Антарктической экспедиции сезона 2014–2015 гг. проведен прием сигналов КА Глобальных навигационных спутниковых систем (КА ГНСС) ГЛОНАСС/GPS. Рассчитан маршрут перехода.

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

В результатах зондирования высокоширотной ионосферы выявлены следы аврорального овала в широтном распределении ионосферных задержек сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

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

введение

Высокоширотная ионосфера была объектом исследований морских арктических экспериментов 2011–2015 гг. на основе технологии подвижного пункта зондирования ионосферы по сигналам космических аппаратов (КА) Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [1]. Основное внимание при зондировании арктической высокоширотной ионосферы уделялось морфологии аврорального овала и критериям его проявления в полном электронном содержании (ПЭС) полярной ионосферы [2, 3].

Авроральный овал в высокоширотной ионосфере является границей полярной шапки. В зоне аврорального овала увеличивается повторяемость сбоев и отказов радиосвязи и навигационной аппаратуры [4]. Положение зоны аврорального овала проецируется на склон внешнего радиационного пояса Земли. Во время магнитных бурь она смещается в сторону средних широт вслед за смещением внешнего радиационного пояса. Смещение почти линейное на 10 градусов при росте Кр-индекса до 5. При большем росте граница аврорального овала может скачком сдвигаться в средние широты [5] изза существенного искажения структуры магнитосферы. При этом дневная область аврорального овала почти вдвое выше ночной.

Авроральный овал определяется как область ионосферы, являющейся проекцией плазменного слоя и каспа вдоль силовых линий геомагнитного поля, где наиболее часто наблюдаются полярные сияния [6]. Смешение аврорального овала в средние широты во время магнитных бурь происходит синхронно с движением границы плазмосферы, максимума внешнего радиационного пояса [7]. Обзор современных представлений об овале полярных сияний в высокоширотной ионосфере представлен в [8].

В климатических моделях описания аврорального овала используются характеристики положения его центральной (экваториальной) части, приполюсной границы, а к средним широтам — границы диффузных сияний. Эти границы связаны с различными энергиями высыпающихся частиц радиационных поясов Земли.

По программе 60-й Российской антарктической экспедиции 2014–2015 гг. один из навигационных приемников («JAVAD»), доставленный научно-экспедиционным судном «Академик Федоров» к

Российской антарктической станции «Прогресс», был включен в состав научного оборудования санно-гусеничного перехода по Антарктиде к материковой станции «Восток» [9]. В течение перехода 08.01–19.01.2015 г. проводилось зондирование ионосферных задержек сигналов ГНСС.

Уникальное географическое положение станции «Восток», расположенной почти в центре южного аврорального овала, и география маршрута санно-гусеничного перехода позволили получить данные о состоянии полярной ионосферы и эффектах проявления следов зоны аврорального овала в ПЭС над Антарктидой.

ОСОБЕННОСТИ ЗОНДИРОВАНИЯ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Основное внимание в эксперименте уделялось расчету ПЭС в подионосферных точках видимых КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS. Данные зондирования ионосферных задержек сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS обрабатывались авторским методом зондирования ионосферы и геодвижений [3]. При этом учитывались особенности морфологии высокоширотной ионосферы и увеличение мелкомасштабных неоднородностей в зоне аврорального овала.

Источником электронов и ионов аврорального овала являются потоки плазмы, которые со всех сторон окружают радиационные пояса Земли. Дневная часть овала обычно совпадает с областью высыпаний электронов (с энергией обычно в 100–300 эВ) граничного плазменного слоя (boundary plasma sheet, BPS), 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 (CPS) [7, 8].

Экваториальная граница ночного аврорального овала обычно связана с экваториальной дугой полярных сияний, в районе которой происходят вспышки брейкапа.

Высыпания электронов и вторжение потоков плазмы приводят к неоднородностям высокоширотной ионосферы. Из-за неоднородностей ионосферы, размеры которых сравнимы с длиной проходящих через них радиоволн, возможно нарушение канонического предположения, используемого при формализации закономерностей распространения радиоволн, сбои приема, замирания и мерцания радиосигналов, ошибки позиционирования [4].

Для ГНСС в областях высокоширотной ионосферы с повышенным содержанием неоднородностей происходит переотражение радиоволн. Траектория радиосигналов на более коротких длинах волн может превысить длину траектории на первых рабочих частотах ГНСС. Следствием этого являются отрицательные оценки относительного ПЭС, рассчитанные традиционным дифференциальным способом [2] для предположения о сферически-симметричном распределении параметров ионосферы.

В этой ситуации для диагностики морфоструктурных особенностей высокоширотной ионосферы имеет смысл анализ модуля рассчитанных оценок относительных значений ПЭС вдоль меридианов. Предполагается, что зона аврорального овала может характеризоваться повышенным значением модуля относительного ПЭС в узком диапазоне широт. Нечеткость подобного представления аврорального овала связана с зонами терминатора и в направлении в хвост магнитосферы.

Положение аврорального овала по критической частоте Е-слоя ионосферы, рассчитанной по модели SIMP2 [10] представлено на рис. 1.

Смещение зоны повышенной концентрации Е-слоя в авроральном овале связано с положением Солнца. Это отмечено в планетарной динамике аврорального свечения над Арктикой [11]. Однако проявления аврорального овала в рассчитанных по модели SIMP2 [10] распределениях ПЭС нет, что физически может объясняться особенностями вертикального распределения электронной концентрации выше Е-слоя высокоширотной ионосферы.

Однако, как показали морские эксперименты в Арктике в 2011–2015 гг. для северного аврорального овала, это не так [2]. Следы аврорального овала диагностировались по характеристикам сигналов отдельных КА ГНСС.

Особенностью зондирования аврорального овала из полярной шапки обусловлена тем, что его положение связано с магнитным полем Земли [11]. 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



Рис. 1. Результаты моделирования критической частоты Е-слоя ионосферы 17. 01. 2015 г. для 00:00 UT и 12:00 UT по модели SIMP2 [10].

магнитных полюсов. В 2015 г. положение Северного магнитного полюса оценивалось в 86.27° с. ш. и 159.18° в. д., а Южного магнитного полюса — 64,26° ю. ш. и 136.59° з. д. [12, 13].

Селекция орбит КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS вблизи магнитного меридиана положения навигационного приемника может повысить четкость проявления признаков аврорального овала.

Для обработки полученных с приемника RINEX-файлов был разработан программноаппаратный комплекс [14]. Его верификация и валидация проводились в ФГБУ «ИПГ» на основе сравнения с данными модели ионосферы IRI-2011, а также в ряде полевых экспериментов, в том числе при определении эпицентра взрыва Чебаркульского метеороида [15].

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 каждым суткам перехода. Рассчитанный маршрут представлен на рис. 2.

Отклонения от отрезка, соединяющего начальную и конечную точки маршрута, соответствуют заявленному в [9] маршруту санно-гусеничного перехода.

Положение наблюдаемых треков КА ГНСС рассчитывалось с помощью [3, 15]. Для примера на рис. 3 представлено положение рассчитанных треков подионосферных точек видимых в течение 17. 01. 2015 г. КА ГНСС.

По расположению треков видно, что существенных 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. 4.

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 [2]. Согласие зоны локального экстремума значений ПЭС по G14 на рис. 4 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 [13].

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. 5.

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 [2].

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 ас-

социировать 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.

В результатах осреднения данных наблюдений значений модуля ПЭС по всем видимым КА GPS за первую четверть суток 17.01.2015 г. проявляется сложное распределение (рис. 6).



Рис. 2. Среднесуточное положение санно-гусеничного перехода к станции «Восток» 08.01–19.01.2015 г.: а — рассчитанный по сигналам ГНСС, б — маршрут 60 РАЭ с официальной страницы эксперимента [4] с увеличенным фрагментом санно-гусеничного перехода.



Рис. 3. Положение треков подионосферных точек видимых 17. 01. 2015 г. КА GPS.



Рис. 4. Изменение ПЭС по широте вдоль подионосферных точек КА G14 (00:55 – 05:42 UT 17.01.2015 г.).



Рис. 5. Изменение ПЭС по широте вдоль треков подионосферных точек КА: a — G04 (18:00 – 19:00 UT); б — G20 (18:00 – 20:12 UT) 17. 01. 2015 г.



Рис. 6. 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.

При осреднении результатов зондирования и расчете поля ПЭС использован весовой пятиточечный фильтр Хемминга [16]. В левом нижнем углу находится Южный географический полюс.

Положение зон повышенных значений относительных ПЭС на рис. 6 предполагает анализ данных о морфологии полярной ионосферы. Такие данные связаны, например, с программой исследования глобальной системы конвекции в ионосфере северного полушария на основе сети ВЧ радаров SuperDARN [17]. Этот проект нацелен на контроль системы глобальной конвекции ионосферы в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях, в том числе в полярных шапках и в зоне аврорального овала.

На картах конвекции, получаемых при помощи наблюдений на сети радаров SuperDARN, внутри полярной шапки Антарктиды фиксируется система областей конвекции плазмы с интенсивными восходящими потоками после восхода и нисходящими перед заходом. Соответствует ли эта система результатам расчета рис. 6 – предстоит проверить, особенно при размещении навигационной аппаратуры на Российской антарктической станции «Восток».

© Институт прикладной геофизики имени академика Е.К.Федорова

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе санно-гусеничного перехода 60-й Российской Антарктической экспедиции к станции «Восток» 8-19.01.2015 г. получены результаты зондирования высокоширотной ионосферы по сигналам ГНСС ГЛОНАСС/GPS.

Расшифрован маршрут санно-гусеничного перехода по Антарктиде.

На основе результатов морских экспериментах по зондированию арктического, аврорального овала предложены критерии для диагностики антарктического аврорального овала в ПЭС на основе диагностики положения локальных экстремумов ПЭС в зоне широт климатического распределения овала. Проведена их апробация фактически в центре антарктического аврорального овала.

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.

Уникальное положение Российской антарктической станции «Восток» необходимо использовать для мониторинга южной полярной шапки Земли.

Благодарности. Автор признателен Ю. В. Писанко за плодотворные дискуссии и А. А. Бермишеву (ИАЦ КВНО ЦНИИМаш) за предоставленные данные.

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.
- Тертышников А.В. 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;
- 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.
- 4. Тертышников А.В. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений / http://elibrary.ru/item.asp?id=21273666.
- 5. Исаев С.И. Морфология полярных сияний. Л.: Наука, 1968. 167 с.
- 6. ГОСТ 25645.109-84. Магнитосфера Земли. Термины и определения.
- 7. Хорошева О.В. Связь геомагнитных возмущений с динамикой магнитосферы и параметрами межпланетной среды//Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 5. С. 579-583.
- 8. Лазутин Л.Л. Овал полярных сияний прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика. 2014. Т. 1. № 1. С. 23-35. DOI: 10.12737/5673.
- 9. https://www.glonass-iac.ru/aboutIAC/the_south_sea_route_in_2014_real_time.php.
- 10. Модель СИМП. // http://space-weather.ru/index.php?page=raschet-sostoyaniya-ionosfery-po-modeli-simp.
- 11. Старков Г.В. Планетарная динамика аврорального свечения/Физика околоземного космического пространства. – Апатиты: ПГИ, 2000.
- 12. http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/GeomagneticPoles.shtml
- 13. Тертышников А.В., Сыроешкин А.В. и др. Магнитные индексы. Учебное пособие. Москва-Обнинск, 2013. 178 с.
- 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.
- 15. Тертышников А.В. и др. Способ определения положения эпицентральной зоны источника и скорости распространения перемещающихся ионосферных возмущений. Патент на изобретение № 2560525. ФГБУ «ФИПС», Рег. № 2014125712/07(041820) от 25.06.2014. Срок действия до 25.06.2034 г.
- 16. Тертышников А.В. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. Учебное пособие. Москва-Обнинск, 2013. 278 с.
- 17. http://superdarn.thayer.dartmouth.edu/

THE MANIFESTATION OF THE AURORAL OVAL OVER ANTARCTICA IN THE CHARACTERISTICS OF GNSS SIGNALS 17.01.2015 NEAR THE STATION "VOSTOK"

A. V. Tertyshnikov

During the sledge track-type vechicle march in Antarctica to the station "Vostok" 08.01–19.01.2015 according to the program of the 60th Russian Antarctic expedition (the season 2014–2015) took place the reception of Global navigation satellite systems (GNSS) GLONASS/GPS signals. The route of the march was calculated.

Discussed are the sensing technology and diagnostic criteria of the auroral oval in the total electron content of the ionosphere (TEC).

Traces of the auroral oval in the latitudinal distribution of ionospheric delays of GNSS GLONASS/GPS signals are revealed in the results of probing the high-latitude ionosphere.

Obtained results were compared 1) with the results of the auroral oval reconstruction by the SIMP2 model 2) with the data taken from the official web page of the experiment.

The necessity of creating a model of the auroral oval based on TEC is demonstrated.

Keywords: Ionosphere, GLONASS, GPS, positioning, ionospheric delay, the electron content, the receiver, auroral oval, technology, model