

УДК 550.8.054

ТЕХНОЛОГИЯ ЗОНДИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИОНОСФЕРНОГО ОВАЛА И МОРФОЛОГИИ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ ПО СИГНАЛАМ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

А.В. Тертышников

Поступила в редакцию 15.04.2015

По результатам экспериментов по зондированию высокоширотной ионосферы по сигналам КА ГНСС с ледоколов и морских судов ледового класса представлены эффекты проявления аврорального овала.

Представлены примеры зондирования положения аврорального овала с помощью геодезического навигационного приемника на НИС «Профессор Молчанов».

Рассмотрены основные этапы технологии зондирования высокоширотной ионосферы и аврорального овала с морских судов по сигналам НКА ГНСС.

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

ВВЕДЕНИЕ

С высокоширотной ионосферой связана зона полярных сияний, ионосферного аврорального овала с повышенной концентрацией холодной плазмы, открытие ионосферных предвестников землетрясений, перспективы зондирования положения магнитного полюса Земли. Высокоширотная ионосфера над Арктической зоной и ее авроральный овал с интенсивной ионосферной токовой струей 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], сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [4]. Наблюдения ионосферы с судов носят экспедиционный характер, фрагментарны и нерегулярны. Хотя в системе метеорологических наблюдений используется информация о погодных условиях с судов. И этот опыт может быть использован при зондировании ионосферы, особенно в Арктической зоне, так как суда, в том числе ледового класса к настоящему времени оснащены навигационными приемниками сигналов КА ГНСС.

СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проверки возможности зондирования высокоширотной ионосферы по сигналам КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS с морских судов в 2014 г. в ходе двух экспедиций Арктического плавучего университета (АПУ) Северного (Арктического) федерального университета был организован эксперимент на научно-исследовательском судне (НИС) «Профессор Молчанов» (рис. 1).



Рис. 1. Научно-исследовательское судно "Профессор Молчанов"

На его правом борту была закреплена антенна геодезического навигационного приемника «Trimble 5700» (рис. 2), подключенная через антенный кабель к приемовычислителю приемника, установленного в каюте для участников экспедиции.

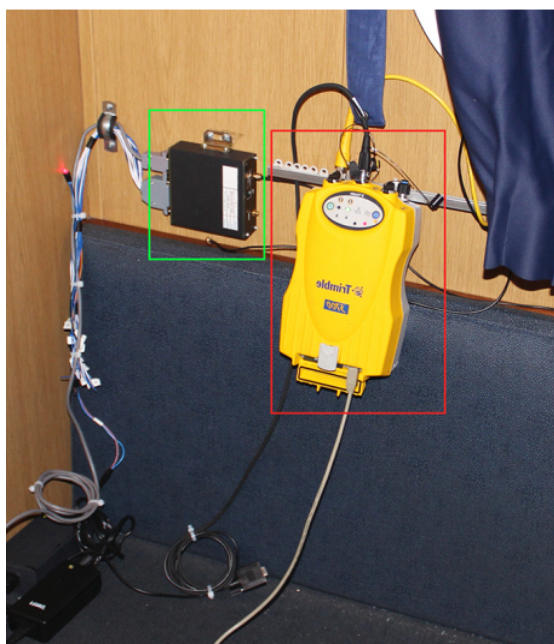


Рис. 2. Навигационный приемник Trimble-5700 и антенна на НИС «Профессор Молчанов» в Карском море, 4.08.2014 г.

Расшифрованный по технологии [4, 5] маршрут судна и часть его 3.08.2014 г. представлены на рис. 3.

На левом фрагменте для ориентира нанесены также дуги, рассчитанные по модели границ аврорального овала Г.В. Старкова [6] на 03.08.2014 г.: 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.

Днем авроральный овал подымается севернее, ночью опускается южнее, становится шире и размывается. Широтное положение границ аврорального овала определяется уровнем магнитной возмущенности через значение a_p -индекса [3, 6], который рассчитывается по интенсивности вариаций магнитного поля Земли по сети высокоширотных станций магнитометрии и токовой струи в зоне аврорального овала.

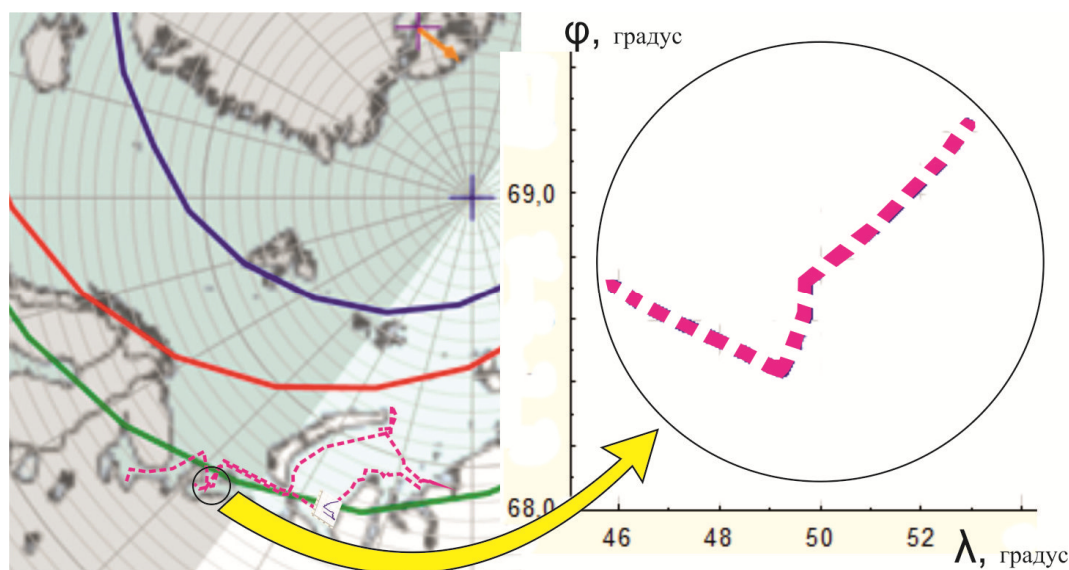


Рис. 3. Маршрут НИС «Профессор Молчанов» 1-19.08.2014 г. (левый фрагмент с примерными границами – дугами положения аврорального овала) и маршрут 03.08.2014 (правый фрагмент).

Приемник сигналов КА ГНСС настроен на основные рабочие частоты навигационных систем. Радиосигналы, принимаемые антенными устройствами, усиливаются, фильтруются и поступают на электронную плату приемника, где усиливаются и преобразуются в цифровой код. Характеристики навигационных сигналов на выходе приемника представляются в бинарной форме и/или в стандартном формате RINEX. В принимаемой информации содержится также информация о положении НКА [4, 5].

Приемник сигналов навигационных КА (НКА) обеспечивает автоматическое непрерывное в реальном масштабе времени определение и выдачу координат антенных устройств в системах координат WGS-84, ПЗ-90. Данные представляются в геодезической проекции с текущими отсчетами времени. Координаты приемника рассчитываются внутренними алгоритмами приемника по 3-4 НКА, выбираемым по критерию минимизации расчетной ошибки [4, 5].

Предварительные расчеты и совместные с ЦНИИМаш эксперименты в 2011 г. вдоль Северного морского пути, и в 2013 г. в рамках проекта АПУ подтвердили достаточную наблюдаемость КА ГНСС в северных морях России и вдоль арктического побережья России, ограничиваемую лишь орбитальным движением КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS и вводимым ограничением на наблюдаемый состав группировки по углу наклона видимых КА над горизонтом. Последнее условие обусловлено попыткой уменьшить влияние тропосферной ошибки на принимаемые приемником характеристики сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS [4].

Полученная в расчетах зона видимости КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS для приемника на судне в северных морях России имела протяженность по широте до 40-45 градусов, а по меридиану до 20-25 градусов. Поэтому географическое положение приемника определяет возможность зондирования холодной плазмы ближнего космоса над полярной шапкой Земли, над полюсом, зоны аврорального овала и каспа. Хотя при приближении приемника к полюсу растут погрешности принимаемых характеристик сигналов от видимых НКА.

При зондировании ионосферы по сигналам КА ГНСС анализируется обусловленная не идеальностью среды распространения радиоволн ионосферная задержка принимаемых сигналов. В расчетах учитываются также аппаратные и инструментальные ошибки приемной и передающей аппаратуры. Инструментальная задержка мало меняется в течение нескольких суток, в то время как начальная фаза остается постоянной на временах сеанса связи с каждым видимым КА. Неизвестные характеристики могут оцениваться сравнением с данными базовой станции системы дифференциальной коррекции и мониторинга целостности группировки навигационных КА (СДКМ), либо с данными контрольно-поверочной станции, по модели ионосферы, с эталонными сигналами с геостационарных КА, наземных и космических ионозондов.

Метод зондирования ионосферы, предлагаемый для проведения эксперимента [4], отрабатывался в зоне действия нагревного стенда "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]. 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.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ 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 подионосферных точек). Среди них отбирались треки, которые проходили вблизи меридиана НИС. Вдоль отобранных треков анализировались широтные градиенты изменения ионосферной задержки сигналов НКА GPS.

Дискретность поступления данных на выходе приемника была установлена в 1 Гц. Объем суточного файла наблюдений составил более миллиона строк по 70-80 цифр в каждой.

Пример широтного изменения полного содержания электронов (ПЭС) по широте под нисходящим треком НКА G10 показан на рис. 4.

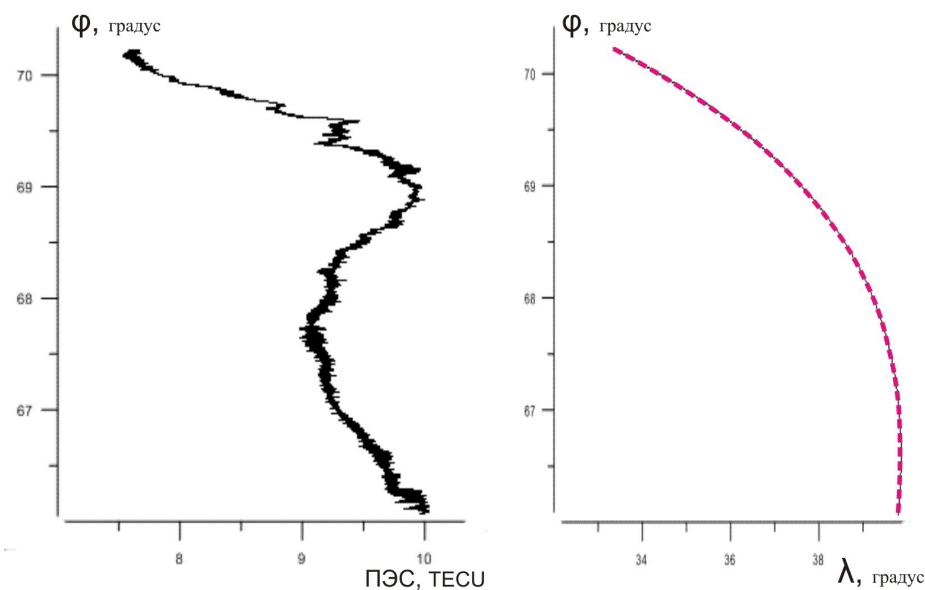


Рис. 4. Изменение ПЭС по широте (левый фрагмент) на нисходящем треке НКА G10 (правый фрагмент) в период 0 ч 0 мин 06 с – 1 ч 58 мин 13 с 03.08.2014 г.

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 [6]. Поэтому можно предположить, что это увеличение и есть проявление аврорального овала.

Однако в этом предположении есть много спорных аспектов. Днем авроральный овал при низкой магнитной возмущенности должен уходить на север и нужно высокоширотное положение приемника (судна), чтобы обнаружить изменения ПЭС в зоне овала. Кроме этого на широтный градиент ПЭС может влиять экранирование сигналов НКА ГНСС, береговой эффект, состояние тропосферы.

На рис. 5 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.

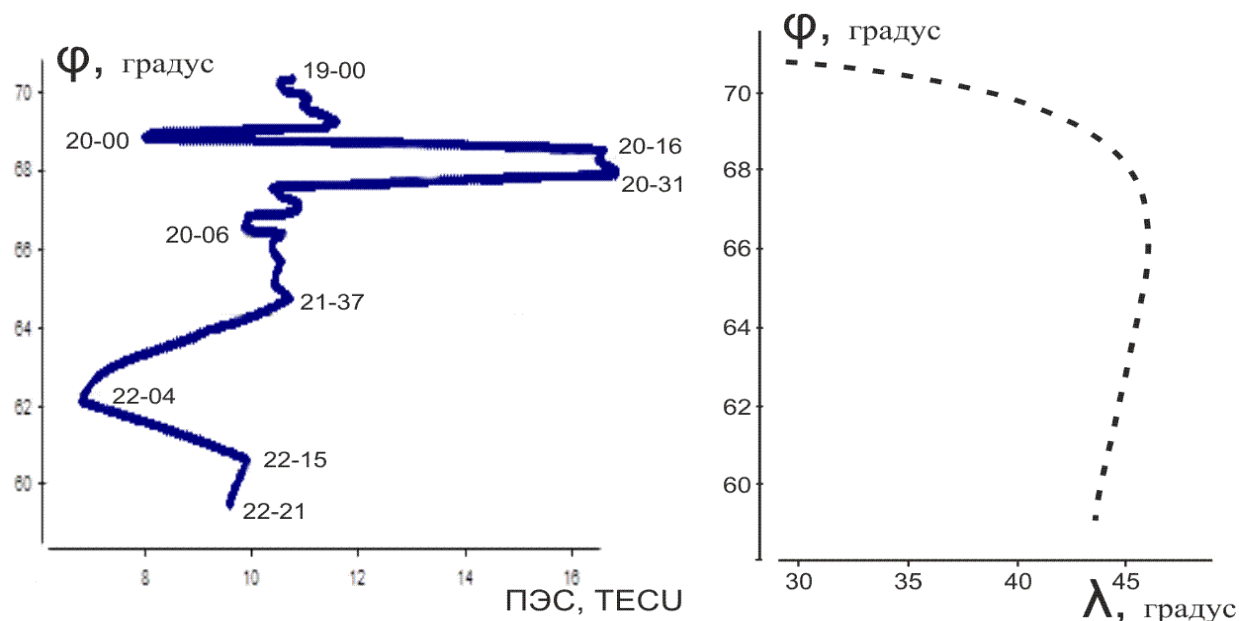


Рис. 5. Изменение ПЭС по широте (левый фрагмент с временными метками) на нисходящем треке НКА G01 (правый фрагмент) 03.08.2014 г.

Резкие широтные градиенты в распределении ионосферной задержки 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 [10, 11], максимальной широтой надира КА GPS. Разница в положении градиентов ионосферной задержки с рис. 4 могла быть обусловлена полуночным (на запад, рис. 4) и предутренним (над НИС, рис. 5) треками НКА.

Достаточно сложные широтные распределения градиентов ПЭС были получены и для ряда треков других НКА. При их анализе учитывалось, что ширина аврорального овала зависит от времени суток. В ряде случаев для ряда треков НКА не было обнаружено эффектов, представленных на рис. 4-5. Широтное распределение ионосферной задержки иногда имело двухмодовый характер, что характерно для ночного аврорального овала. Сложная морфология распределения ионосферной задержки была отмечена к полюсу и в зоне каспа.

В зоне аврорального овала существенно возрастал поток сбоев выдачи данных на выходе навигационного приемника. В полученных записях сигнал был поломанным и не мог быть дешифрован. Возникновение сбоев и отказов навигационной аппаратуры анализировалось также в связи с установкой антенны у борта судна и возможным экранированием сигналов группировки НКА ГНСС надстройками судна. Этим аргументов предлагается частично объяснить причины некоторых сбоев в приеме сигналов ГНСС GPS, а также случаи отсутствия эффектов проявления аврорального овала, особенно на восходящих треках НКА.

Геомагнитная обстановка во время экспериментов была спокойной [3].

СХЕМА ЗОНДИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

На рисунке 6 представлены основные этапы технологии зондирования положения аврорального овала по принимаемым в высоких широтах сигналам КА ГНСС.

Возможность использования навигационного приемника сигналов ГНСС определяется оценками приполюсной границы аврорального овала по модели Г.В.Старкова. Это особенно актуально для полярных труднодоступных станциях.

Расчет треков подионосферных точек для НКА производится обычно на основе предположения об ионосфере – тонком слое на высоте 50-1000 км над земной (морской) поверхностью. При этом треки, удаленные на восток и запад от меридиана приемника, позволяют зондировать овал приемниками в зоне овала.

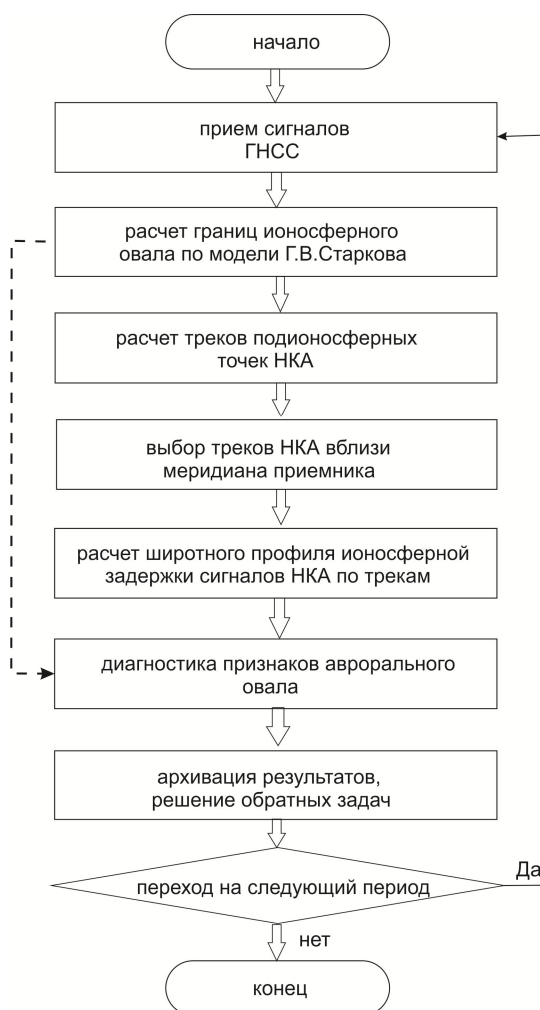


Рис. 6. Основные этапы технологии расчета положения аврального овала по сигналам КА ГНСС

Выбор треков и соответствующих НКА важен для квазистационарных приемников в связи с повтором этих треков через каждые 12 часов. То есть, после первого расчета и выбора треков для зондирования овала с квазистационарного навигационного приемника, через 12 часов можно использовать выбранные треки видимых НКА и не производить расчет для всех НКА. Это ускоряет время расчетов.

Для выбранного набора треков производится расчет широтного профиля ионосферной задержки. По результатам анализа профилей производится фильтрация набора треков.

По широтным профилям ионосферной задержки и с учетом результатов расчетов по модели Г.В. Старкова производится диагностика положения приполюсной границы аврального овала для окончательного набора треков. В качестве признаков аврального овала используются локальные экстремумы в широтном распределении ионосферной задержки.

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.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам экспериментов по зондированию высокоширотной ионосферы по сигналам ГНСС с ледоколов и морских судов ледового класса выявлена возможность зондирования положения аврального овала.

Представлены примеры зондирования положения аврального овала с помощью

геодезического навигационного приемника сигналов ГНСС на НИС «Профессор Молчанов».

Авроральный овал проявляется в локальном экстремуме распределения широтных градиентов электронной концентрации, в соответствии с морфологией аврорального овала, в том числе по модели Г.В. Старкова.

Рассмотрены основные этапы технологии зондирования высокоширотной ионосферы и аврорального овала с морских судов по сигналам ГНСС.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-00029, № 14-05-10024, № 15-05-10029.

ЛИТЕРАТУРА

1. Положение о порядке действий учреждений и организаций при угрозе возникновения и возникновении опасных природных явлений. РД 52.88-699-2008.
2. Тертышников А.В. Возможные коррективы критериев опасных гелиогеофизических явлений / <http://elibrary.ru/item.asp?id=21273666>
3. Тертышников А.В., Лапшин В.Б., Сыроешкин А.В. и др. Магнитные индексы. Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013. 178 с.
4. 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.
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. Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения//Геомagnetизм и аэрономия, 1994, т. 34, № 3. С. 80-86.
7. Тертышников А.В., 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. Тертышников А.В. 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. Фаермарк Д.С., Фельдштейн Я.И., Левитин А.Е., Афонина Р.Г., Белов Б.А., Гайдуков В.Ю., Демидова Ю.З. Энерговыведение в высоких широтах при диссипации ионосферных токов// Геомagnetизм и Аэрономия, 1985, Т 25, № 2. С. 247-253.
11. Писарский В.Ю., Руднева Н.М., Фельдштейн Я.И., Графе А. О параметре распада кольцевого тока// Геомagnetизм и Аэрономия, 1986. Т. 26, № 3. С. 454-460.

GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM SIGNAL SOUNDING TECHNOLOGY OF IONOSPHERE OVAL POSITION AND HIGH LATITUDE IONOSPHERE MORPHOLOGY.

A.V. Tertyshnikov

Auroral oval manifestations are presented in the results of GNSS spacecraft experiment on sounding of high-latitude ionosphere with the receivers onboard ice breakers and sea vessels. Examples of sounding of auroral oval position by means of the geodetic navigation receiver onboard "Professor Molchanov" ship are presented. The main stages of technology of sounding of high-latitude ionosphere and auroral oval from sea vessel based receivers of GNSS spacecraft signals are considered.

KEYWORDS: IONOSPHERE, EARTHQUAKE, FORERUNNERS, GLONASS, GPS, POSITIONING, ELECTRON CONTENT, RECEIVER, TECHNOLOGY, SEISMIC DANGER, AVROALNY OVAL, CURRENT STREAM, MODEL