

DOI: 10.51981/2588-0039.2023.46.033

## СПОСОБЫ ЗОНДИРОВАНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КА

А.В. Тертышников

*Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия*

### Аннотация

Рассмотрены способы зондирования аврорального овала с использованием КА. Приведены примеры результатов радиопросвечивания авроральных овалов сигналами КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS в Арктике и Антарктике. Следы аврорального овала проявляются в широтном распределении ионосферных задержек сигналов КА ГНСС. При оценке полученных результатов использованы результаты моделирования аврорального овала по модели SIMP2 и Г.В. Старкова. Показана необходимость создания модели аврорального овала по полному электронному содержанию ионосферы (ПЭС). Приведены примеры реализации технического решения по диагностике положения аврорального овала по потокам низкоэнергичных частиц, регистрируемых спектрометрами КА. Предложены критерии для диагностики положения авроральных овалов.

**Ключевые слова:** авроральный овал, ГЛОНАСС, GPS, позиционирование, ионосферная задержка, приемник, технология, модель, потоки, спектрометр, мониторинг.

### Введение

Авроральный овал – это область ионосферы, где наиболее часто наблюдаются полярные сияния [1], и фактическая граница полярной шапки – высокоширотной ионосферы. Во время магнитных бурь авроральный овал смещается в средние широты, синхронно с движением границы плазмосферы, максимума внешнего радиационного пояса [2].

Авроральный овал «висит» над Северным морским путем. Зона аврорального овала с ионосферной токовой струей оказывают существенное влияние на качество радиосвязи и позиционирования по сигналам КА глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), безопасность энергетических, коммуникационных и транспортных систем [1, 3].

Для мониторинга высокоширотной ионосферы используются расположенные на суше и островах станции ионосферного зондирования, сеть магнитных обсерваторий и риометров, наблюдения за проявлением полярных сияний, системы РЛС, КА дистанционного зондирования Земли, радары, сигналы глобальных навигационных спутниковых систем [3]. Есть перспектива наблюдений ионосферы с судов – в составе навигационного оборудования есть приемники сигналов КА ГНСС.

В зоне аврорального овала со сложной морфологией и ионосферной токовой струей (<http://superdarn.thayer.dartmouth.edu/>) наблюдается повышенная повторяемость сбоев сигналов Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и ошибок в расчетах позиционирования приемовычислителями навигационных приемников. Специальная подготовка приемников (увеличение отрезка времени для сумматоров и др.) позволяет повысить устойчивость навигационного оборудования в высоких широтах. Но полностью избавиться от влияния сложноструктурированной ионосферной плазмы в зоне аврорального овала невозможно. Для ГНСС, которые проектировались не для высоких широт [4], необходимы специализированные модели аврорального овала.

Исследования аврорального овала связаны с ФГБУН ПГИ (Мурманск, Г.В. Старков, В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина и др.), Росгидрометом (ФГБУ ИПГ, патенты по мониторингу аврорального овала [1, 3]), разработками Уфимского университета (А.В. Воробьев и др.), ФГБУН ИКИ (проекты авровизора). Обзор современных представлений об овале полярных сияний в высокоширотной ионосфере представлен в [5].

Основными характеристиками аврорального овала являются интенсивность и положение границ: центральной (экваториальной) части, приполюсной границы, а к средним широтам – границы диффузных сияний. Плотность и морфология овала обычно фиксируется по интенсивности свечений. Границы овала связаны с различными энергиями высыпавшихся частиц радиационных поясов Земли. Преимущественно с низкоэнергичными частицами, согласно [5].

Для оперативной практики мониторинга аврорального овала активно используется модель Г.В. Старкова [6], а для сверхкраткосрочного прогноза модель А.В. Воробьева [7], в которой могут ассимилироваться данные наблюдений с КА. Прогностические выводы сверхкраткосрочных моделей, в том числе по появлению

полярных сияний, имеют вероятностный характер. Их можно использовать для инерционного прогноза при стабильных гелиогеофизических условиях. Но как связать эти модели с плотностью ионосферы и ионосферной задержкой сигналов ГНСС?

Весьма успешным проектом по расчету плотности основных слоев ионосферы в полярной шапке является отечественная модель SIMP2 [8, 9]. В ней авроральный овал проявляется только в плотности E-слоя ионосферы. Это обусловлено особенностями вертикального распределения плотности высокоширотной ионосферы. В интегральной плотности ионосферы по всем высотам авроральный овал почти не видно.

SIMP2 – аналитическая модель. Во входных параметрах используются климатические данные, которые корректируются по данным зондирования ионосферы и магнитной активности, и аналитические решения. Если использовать эту модель как основу для модели аврорального овала по ПЭС, то необходимы результаты верификации и валидации. Для этого нужны оценки соответствия модельных и фактических результатов зондирования аврорального овала.

### **Способ радиопросвечивания плазмы аврорального овала**

Для диагностики плазмы аврорального овала кроме наземных оптических наблюдений может использоваться технология радиопросвечивания овала сигналами ГНСС [1, 10, 11]. Схема зондирования предусматривает прием в полярной шапке сигналов ГНСС от КА, проекции траекторий которых на поверхность Земли проходят вблизи меридиана расположения приемника. В ходе обработки данных морских экспериментов по зондированию полярной шапки Арктики по этой технологии было установлено, что селекция орбит КА ГНСС вблизи магнитного меридиана, на котором находился навигационный приемник, позволяет повысить четкость проявления признаков аврорального овала. Если трек подионосферных точек КА ГНСС скользил вдоль или под небольшим углом к авроральному овалу, то получаемые данные зондирования оказывались сильно зашумленными. К тому же приходилось учитывать ограничения по времени наблюдения движущихся КА, появляющихся и уходящих из зоны обзора приемника. Повторение траекторий через каждые 12 часов с задержкой на пару минут упрощает селекцию конфигурации траекторий отдельных КА ГНСС, для которых линия «приемник-КА» может пересечь зону аврорального овала на восходящем или нисходящем участке траектории до ухода из зоны видимости.

В морских арктических экспериментах 2011-2015 г.г. [4] для радиопросвечивания аврорального овала использовался геодезический навигационный приемник сигналов ГНСС «Trimble 5700». Для радиопросвечивания овала Южной полярной шапки использовался навигационный приемник («JAVAD») и программы из [12]. Он входил в состав научного оборудования санно-гусеничного перехода по Антарктиде к материковой станции «Восток» 8-19.01.2015 г. [13]. При этом были получены подобные арктическим следы зоны аврорального овала в ПЭС над Антарктидой.

До экспериментов в полярных шапках Земли технология радиопросвечивания ионосферы отрабатывалась на нагревном стенде "Сура", в Приэльбрусье, на Байконуре при запуске тяжелых ракет [11], в расчетах координат взрыва Чебаркульского метеороида [14]. В технологию 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) [15].

При радиопросвечивании рассчитывалось ПЭС в подионосферных точках, видимых КА ГНСС. Для обработки RINEX-файлов использовался программно-аппаратный комплекс [12]. Его верификация и валидация проводились при сравнении с данными модели ионосферы IRI-2011 в ходе экспериментов в ФГБУ «ИПГ» (Москва). При этом, для каждого КА ГНСС была получена оценка аппаратной ошибки в расчете ПЭС. В дальнейшем ошибки регулярно уточнялись для каждого КА ГНСС.

В практике расшифровки сигналов ГНСС, пересекающих полярный круг в область высоких широт, было отмечено: сигнал на более длинной рабочей волне приходил раньше, чем сигнал на короткой рабочей волне. Объяснение этого явления связано с тороидальным (не сферически симметричным) представлением ионосферы Земли и увеличением ионосферных неоднородностей в высоких широтах и в зоне аврорального овала.

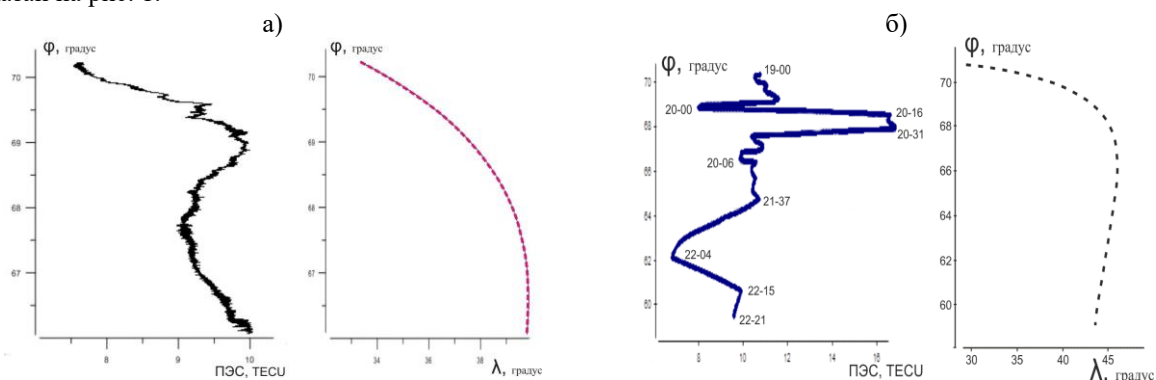
### **Примеры результатов радиопросвечивания аврорального овала**

#### ***В Арктике***

Возможность радиопросвечивания аврорального овала сигналами ГНСС определяется условиями размещения приемника в зоне полярной шапки, наличием адекватных моделей границ аврорального овала, прогнозом состояния магнитного поля Земли и солнечного ветра (WSA-ENLIL Solar Wind Prediction и др.).

Положение аврорального овала проявляется в широтном градиенте ионосферной задержки сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS, проходящих вблизи от маршрута судна. Проекция треков наблюдаемых с судна НКА (фактически вдоль подионосферных точек НКА) рассчитывалась помощью [12]. Из них отбирались треки, которые проходили вблизи меридиана НИС. Вдоль отобранных треков анализировались широтные градиенты изменения ионосферной задержки сигналов НКА GPS.

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



**Рисунок 1.** Изменение ПЭС по широте:

(а, левый фрагмент) на нисходящем треке НКА G10 (а, правый фрагмент) в период 0 ч 0 мин 06 с – 1 ч 58 мин 13 с 03.08.2014 г.; (б, левый фрагмент с временными метками) на нисходящем треке НКА G10 (б, правый фрагмент) 03.08.2014 г.

На фрагменте рис. 1б 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.

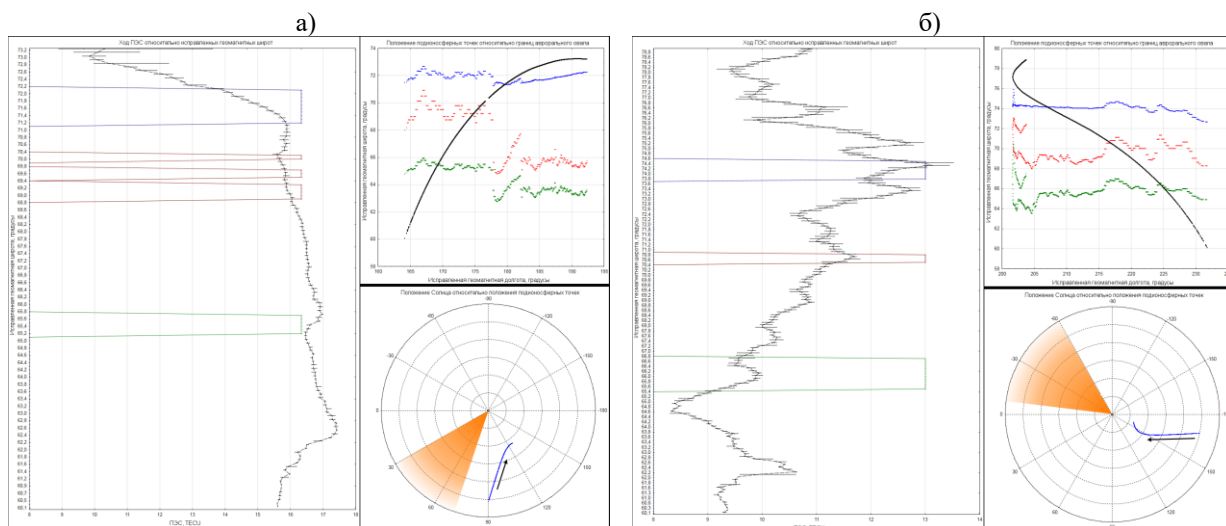
Над средними широтами проявляется ночное обеднение плотности ионосферы.

Аномальное увеличение ионосферной задержки на широтах 69-67 градусов может быть обусловлено плазмой аврорального овала, возможностью существования ионосферной токовой струи [1], 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. Можно предположить, что это увеличение и есть проявление аврорального овала.

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 сбросов выдачи данных на выходе навигационного приемника.

Геомагнитная обстановка во время экспериментов была спокойной. Кр-индекс по данным [16] для 03.08.2014 г. оценивался как 1+. Солнечная активность была низкой. Рассчитанные путем подбора значения AL-индекса для разного положения границ овала по модели Г.В. Старкова соответствовали данным [17]. В расчетах использовались данные о положении магнитных полюсов Земли по Международной геомагнитной опорной модели IGRF (International Geomagnetic Reference Field).



**Рисунок 2.** 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 рис. 2 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 [6] с фактическими значениями AL-индекса. Данные были получены 28.08.2013 г. с НИС «Академик Федоров».

Прямоугольниками обозначены пересечения подионосферными точками выбранных КА 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. 2 б оказались севернее границ, рассчитанных по модели Г.В. Старкова, что может быть обусловлено установленной в расчетах высотой тонкого слоя сферически-симметричной ионосферы для расчета подионосферных точек. Приполюсная и экваториальная границы овала характеризуются резким градиентом изменения ПЭС от широты – на 2 – 3 TECU на 0,5° широты (синяя и красная стрелки на графике). Граница области диффузного свечения характеризуется постепенным увеличением ПЭС с увеличением геомагнитной широты.

Эксперименты показали, что технология зондирования высокоширотной ионосферы и аврорального овала реализуема с труднодоступных высокоширотных станций.

### В Антарктиде

В южной полярной шапке эксперимент по радиопросвечиванию аврорального овала был реализован при транспортировке навигационного приемника на санно-гусеничном поезде к Российской антарктической станции «Восток».

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.

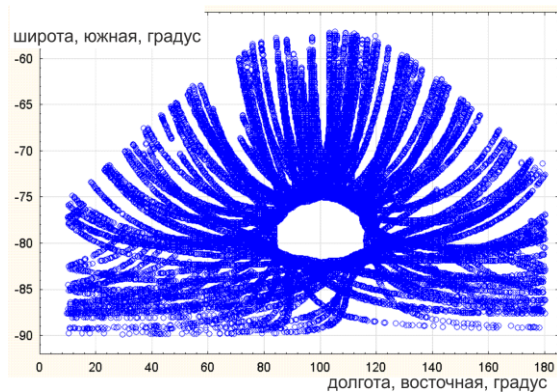
Рассчитанный по сигналам ГНСС маршрут на рис. 3 соответствует представленному в [13] маршруту санно-гусеничного перехода и особенностям рельефа Антарктиды.

Положение наблюдаемых треков КА ГНСС рассчитывалось с помощью программы [12]. Для примера ее возможностей и реально наблюдаемых КА на рис. 4 представлено положение рассчитанных треков подионосферных точек видимых в течение 17.01.2015 г. КА ГНСС вблизи южного географического полюса.



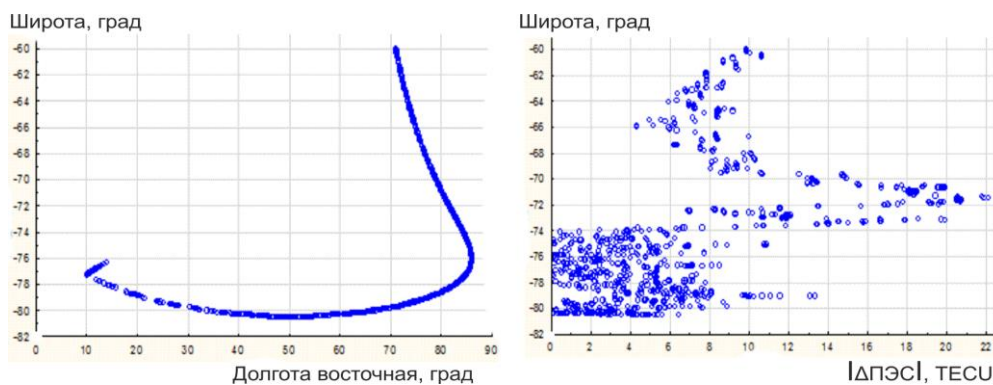
Рисунок 3. Среднесуточное положение санно-гусеничного перехода к станции «Восток» 8-19.01.2015 г.

По расположению треков можно сделать вывод, что существенных экранировок приемной антенны навигационного приемника, установленного на санно-гусеничном поезде, не было. Треки подионосферных точек на рис. 4 расположены достаточно равномерно, но, при зондировании все же основное внимание следует уделить сектору вдоль относительно центрального меридиана, на котором находился приемник сигналов КА ГНСС.



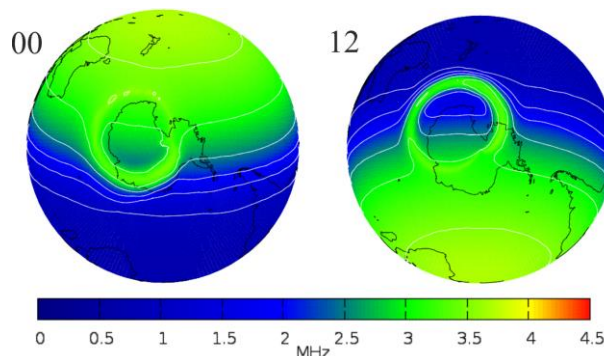
**Рисунок 4.** Положение треков подионосферных точек видимых 17.01.2015 г. КА GPS.

Один из примеров полученных результатов зондирования зоны аврорального овала представлен на рис. 5 в виде двух фрагментов. Слева показана проекция подионосферных точек навигационного КА GPS G14 17.01.2015 г. Справа – изменение ПЭС по широте вдоль этой траектории.



**Рисунок 5.** Результаты зондирования зоны аврорального овала по сигналам КА G14 (00:55 – 05:42 UT 17.01.2015 г.): слева – траектория подионосферных точек, справа – рассчитанное изменение ПЭС по широте.

В полученных результатах достаточно очевидно, что при пересечении КА GPS G14 диапазона широт 72-73 град. Ю. ш. наблюдается резкое изменение модуля ПЭС, как при зондировании зоны арктического аврорального овала [4].



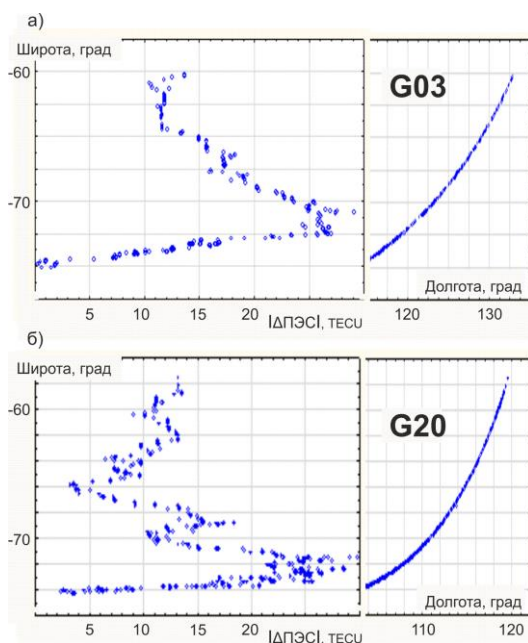
**Рисунок 6.** Результаты моделирования критической частоты E-слоя ионосферы 17.01.2015 г. для 00:00 UT и 12:00 UT по модели SIMP2 [8].

Для проверки полученных результатов зондирования повышенных значений ПЭС в зоне аврорального овала были использованы результаты моделирования ионосферы по модели SIMP2, доступные на сайте ФГБУ ИПГ. Пример расчета положения аврорального овала по критической частоте E-слоя ионосферы на основе модели SIMP2 [8] представлен на рис. 6.

Смещение зоны повышенной концентрации E-слоя в овале связано с положением Солнца и учтено в алгоритмах модели SIMP2. Критическая частота ионосферы коррелирует с оценками ПЭС.

Согласие положения зоны локального экстремума значений ПЭС по G14 на рис. 5 с результатами моделирования E-слоя ионосферы по модели SIMP2 (65-68 град. Ю. ш. на ~ 80 град. В.д.) на рис. 6 можно считать удовлетворительным. Геомагнитная обстановка 17.01.2015 г., как и в течение всего перехода, была спокойной [16].

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. 7.



**Рисунок 7.** Результаты зондирования зоны аврорального овала: слева – рассчитанное изменение ПЭС по широте, справа – траектория подионосферных точек для КА: а) G04 (18:00 – 19:00 UT) и б) G20 (18:00 – 20:12 UT) 17.01.2015 г.

Подобранные в примерах треки отличаются по времени прохождения КА и направлением (нисходящий и восходящий). Здесь также есть различие в широте положения локального экстремума значений ПЭС по широте порядка 5 градусов относительно результатов моделирования медианы E-слоя ионосферы по модели SIMP2 на рис. 6. 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 и в арктических морских экспериментах [4].

Учитывая отсутствие адекватных оперативных моделей ПЭС для зоны аврорального овала, а также результаты сравнения известных климатических моделей для полярной ионосферы в [18], где фактически игнорируется зона аврорального овала), его положение 17.01.2015 г. над Антарктидой в секторе меридианов 60-110 градусов восточной долготы ассоциируется с выявленным в ходе расчетов повышенным ПЭС на 69-73 градусах южной широты.

### Способ диагностики характеристик аврорального овала по потокам низкоэнергичных частиц

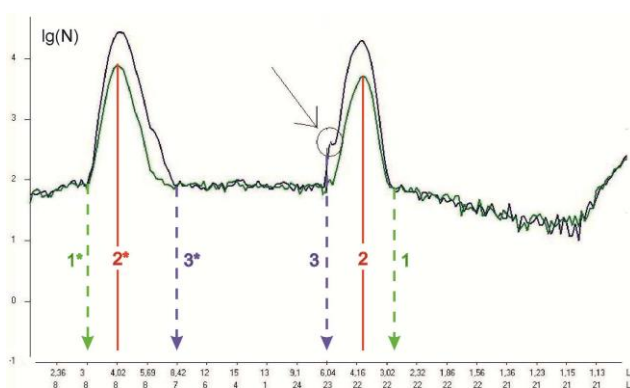
Основой способа диагностики характеристик аврорального овала по высыпаниям низкоэнергичных частиц, фиксируемых с КА, являются полученные В.Г. Воробьевым и О.И. Ягодкиной статистические климатические данные с американских КА DMSP (<http://sd-www.jhuapl.edu>). Развитие этих исследований предполагает использование аналогичных данных с КА «Метеор» и учет смещения положения магнитного полюса Земли,

с которым в модели Г.В. Старкова связан расчет положения границ аврального овала. Нужны также прогнозы состояния магнитного поля Земли и солнечного ветра.

Морфоструктурные границы аврального овала связаны с различной энергией высыпаний частиц из внешнего и внутреннего радиационных поясов Земли (хвоста магнитосферы). Центральная зона аврального овала проявляется в повышенной плотности ионосферы. 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) [5]. Экваториальная граница ночного аврального овала обычно связана с экваториальной дугой полярных сияний, в районе которой происходят вспышки брейкпапа. Высыпания электронов и вторжение потоков плазмы приводят к неоднородностям ионосферной плазмы.

Интенсивность аврального овала характеризует относительная, по сравнению с климатическими значениями, амплитуда зафиксированных экстремумов интенсивности потоков электронов.

Для понимания способа диагностики характеристик аврального овала на рис. 8 приведены результаты регистрации потока электронов с энергией более 100 кэВ по двум каналам гейгеровского датчика КА «Метеор 3М № 1» при пересечении арктического аврального овала на одном из витков 21.02.2002 г.



**Рисунок 8.** Скорость счета электронов с энергией более 100 кэВ по двум каналам гейгеровского датчика КА «Метеор 3М № 1» при пересечении арктического аврального овала на одном из витков 21.02.2002 г. Кружком отмечен эффект высыпания электронов.

Линия 1 – минимум высыпаний на границе диффузных сияний,

Линия 2 – максимум высыпаний на экваториальной границе овала,

Линия 3 – минимум высыпаний на приполюсной границе аврального овала.

В этом примере использована одна из типовых записей измерений из [19], где пересечение аврального овала КА «Метеор 3М № 1» проявляется в двух экстремумах интенсивности регистрируемого потока электронов. По оси абсцисс отмечены пересекаемые L-оболочки и местное время. КА «Метеор» имеет солнечно-синхронную орбиту (средняя высота орбиты на экваторе – 835 км, наклонение – 98,85 град, период обращения – 101,3 мин, расчетное время существования 3-7 лет).

Два горба на рис. 8 – это пересечение аврального овала, ограничивающего полярную шапку. Экстремумы интенсивности счета электронов связаны с внешним радиационным поясом и приполюсной границей полярных сияний. Вертикальными стрелками и линиями отмечены потенциальные границы овала. Спектрометр бортового гелиогеофизического комплекса фиксирует корпускулярные излучения в диапазонах энергий 0,05...20,0 кэВ, 0,03...1,5 МэВ и 0,5...30,0 МэВ [3].

Пример вспышки высыпаний зафиксирован в изломе склона кривой, отмеченном в круге у верхнего основания линии 3. Это событие произошло на долготе 56,2 градусов в течение 12 секунд.

Два пространственно разнесенных экстремума интенсивности счета потоков энергичных электронов при пересечении КА аврального овала – достаточное условие для технического решения способа оперативного зондирования аврального овала по данным о потоках электронов в нескольких диапазонах энергий от 100-300 эВ до 10 кэВ с помощью бортовых (на КА) датчиков (далее спектрометров). Спектрометры регулярно пересекают авральный овал по полярной или близкой к ней орбите в ОКП. Географическое положение экстремумов в регистрируемых потоках электронов в диапазонах больших энергий до 10 кэВ и малых энергий до 300 эВ будет характеризовать границы зоны экваториальной границы аврального овала (линия 2 и 2\* на рис. 8). Интенсивность аврального овала характеризует относительная, по сравнению с климатическими значениями, амплитуда экстремумов.

Положение подошвы склона всплеска интенсивности высыпаний низкоэнергичных электронов в диапазоне малых энергий до их фоновых значений будет соответствовать границе диффузных сияний (в сторону низких

широт, линии 1 и 1\* на рис. 8) и приполюсной границе аврорального овала (в сторону полюса, линии 3 и 3\* на рис. 8). При этом, возможно зондирование состояния магнитного поля Земли по полученным координатам экваториальной границы овала путем подбора её наилучшего совпадения с климатическим положением по модели овала и задаваемыми оценками магнитной активности. По длительным рядам наблюдений возможен даже подбор положения магнитного полюса Земли. Для уточнения полученных результатов могут использоваться данные доступных наблюдений в приавроральной зоне.

Данные зондирования с бортового спектрометра могут обрабатываться как на борту КА, так и в пунктах приема и обработки информации с КА. При этом, спектрометр низкоэнергичных электронов должен обеспечить измерение дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов в указанном интервале 0,05...100,0 кэВ и плотности потока электронов с отстройкой от фона протонов в нескольких энергетических интервалах (например, 0,05-0,3-1,5-7,0-50,0-200 кэВ). Регистрация потоков низкоэнергичных электронов целесообразно осуществлять из одного направления, например, по оси Z космического аппарата (зенит) с помощью спектрометра. Технологические особенности исполнения детекторов определяются имеющимися ресурсами и факторами ОКП. В качестве детекторов могут, например, использоваться электростатические анализаторы сегментоидного типа, позволяющие минимизировать габариты системы селекции частиц низких энергий. Частота опроса и передачи информации в бортовые приемовычислители должна быть не менее 1,0 Гц, учитывая космические скорости движения КА и малое время пересечения аврорального овала. Один из примеров технического решения для компактного бортового спектрометра представлен в полезной модели в [20].

Управление спектрометром (команды, питание, бортовое время) должно осуществляться непосредственно служебными системами КА. Информационный обмен спектрометра с КА – через контроллеры, которые обеспечивают сбор информации, запоминание и формирование кадра информации, подаваемого на соответствующую служебную систему КА.

Предложенный способ зондирования характеристик аврорального овала реализуем с использованием космических технологий, в том числе малых и микро КА в качестве носителей спектрометров или детекторов энергичных частиц, характеризуется простотой, возможностью оперативной оценкой положения аврорального овала и состояния магнитного поля Земли.

## Выводы

Рассмотрены способы зондирования аврорального овала с помощью радиопросвечивания высокоширотной ионосферы сигналами КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS и по потокам низкоэнергичных частиц с КА.

Приведены примеры реализации способа радиопросвечивания авроральных овалов полярных шапок Земли в Арктике и Антарктике. Выявлены следы аврорального овала в широтном распределении ионосферных задержек сигналов КА ГНСС. При оценке полученных результатов использованы результаты моделирования аврорального овала по модели SIMP2 и Г.В. Старкова.

Показана необходимость создания модели аврорального овала по полному электронному содержанию ионосферы (ПЭС).

Предложены критерии для диагностики положения авроральных овалов.

## Литература

1. Тертышников А.В. Способ определения положения аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Патент на изобретение. Решение РОСПАТЕНТа от 19.07.2016 г. по заявке № 2015126532/28(041268) от 02.07.2015 г.
2. Тертышников А.В., Сыроешкин А.В. и др. Магнитные индексы. Учебное пособие. – Москва-Обнинск, 2013. 178 с.
3. Тертышников А.В. Способ определения характеристик аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Патент на изобретение № 2683113. Заявка: 2018110604, 26.03.2018.
4. Тертышников А.В., 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.
5. Лазутин Л.Л. Овал полярных сияний – прекрасная, но устаревшая парадигма. Солнечно-земная физика. 2014. Т. 1, № 1. С. 23–35. DOI: 10.12737/5673
6. Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения. Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т. 34, № 3. С. 80–86.
7. Воробьев А.В., Воробьева Г.Р., Соловьев А.А., Пилипенко В.А. Интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний. Солнечно-земная физика. 2022. Т. 8, № 2. С. 93–100. DOI: 10.12737/szf-82202213
8. Бадин В.И., Деминов М.Г., Деминов Р.Г., Шубин В.Н. Модель медианы критической частоты E-слоя для авроральной области. Солнечно-земная физика. 2013. Вып. 22. С. 24–26.
9. Модель СИМП // <http://space-weather.ru/index.php?page=raschet-sostoyaniya-ionosfery-po-modeli-simp>
10. 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>
11. 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/>
  12. 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.
  13. 60-я Российская антарктическая экспедиция 2014-2015 гг. / [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)
  14. 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.
  15. 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.
  16. <http://www.celestrak.com/SpaceData/>
  17. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>
  18. Jiang H., Liu J., Wang Z., An J., Ou J., Liu S., Wang N. Assessment of spatial and temporal TEC variations derived from ionospheric models over the polar regions. Journal of Geodesy. 2018. P. 1–17. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00190-018-1175-6>
  19. Барсуков Ю.С. Зависимость числа событий высыпаний энергичных электронов на спутнике «Метеор 3М №1» от напряжённости магнитного поля и параметра Мак-Илвайна в 2002-2005 гг. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=119>
  20. Брильков И.А., Оседло В.И., Панасюк М.И., Рубинштейн И.А., Тулупов В.И., Щербовский Б.Я. Спектрометр энергичной космической радиации (СПЭР). Заявка: 2015149253/28, 17.11.2015. Опубликовано: 27.09.2016. Бюл. № 27.