

СПОСОБ ЗОНДИРОВАНИЯ ГРАНИЦ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА И СОСТОЯНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОСМИЧЕСКИХ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ

А.В. Тертышников

Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова, Москва, Россия;
e-mail: *atert@mail.ru*

Аннотация. Приведён обзор разработанных в ФГБУ «ИПГ» (Росгидромет) технических решений для зондирования авроральных овалов и сопутствующих им решений. Последнее техническое решение для диагностики характеристики авроральных овалов построено на основе зондирования ионного состава верхней атмосферы космическими радиочастотными анализаторами масс-спектра газового состава верхней атмосферы на орбите КА. В анализе использовано распределение основного иона кислорода O^+ на высотах орбиты КА «Метеор», а также результаты моделирования аврорального овала по моделям SIMP-2 и Г.В. Старкова.

Введение

В космических исследованиях Росгидромета много внимания уделяется разработке технических решений мониторинга аврорального овала, висящего над Северным морским путём. Полученные результаты исследований закреплены в ряде патентов на изобретение, которые определяют возможность их реализации и используются в формировании научно-технической политики Росгидромета.

Последним техническим решением Росгидромета по мониторингу аврорального овала стал «Способ зондирования границ аврорального овала и состояния магнитного поля Земли» [1] на основе данных зондирования плотности ионов бортовым масс-спектрометром КА «Метеор». Для разработки [1] использовалось несколько технических решений, полученных ранее.

Предшествующие технические решения

Для разработки технологий зондирования аврорального овала в ФГБУ «ИПГ» использовались результаты морских экспедиций в Северном ледовитом океане, где проводились эксперименты по радиопросвечиванию Северного аврорального овала сигналами Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [2]. В схеме экспериментов проводился прием и расшифровка сигналов КА ГНСС ГЛОНАСС/GPS с помощью профессионального геодезического приемника сигналов ГНСС («Trimble 5700»). Искажение сигналов ГНСС в зоне овала было подтверждено при радиопросвечивании Южного аврорального овала при санно-гусеничном переходе по Антарктиде к станции «Восток» 8-19.01.2015 г. по программе 60-й Российской Антарктической экспедиции [3]. При этом были получены подобные арктическим следы зоны аврорального овала над Антарктидой в широтном распределении ионосферных задержек сигналов КА ГНСС. При оценке полученных результатов использовались модели SIMP-2 [4] и Г.В. Старкова [5]. Все способы зондирования ионосферы сигналами КА ГНСС были закреплены в техническом решении [6]. Была показана необходимость создания модели аврорального овала по полному электронному содержанию ионосферы (ПЭС).

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 увязывалось с тороидальным (не сферически симметричным) представлением ионосферы Земли и увеличением ионосферных неоднородностей в высоких широтах и в зоне аврорального овала.

Во втором техническом решении использовались данные по высыпаниям низкоэнергичных частиц, фиксируемых с КА [7], а также результаты исследований В.Г. Воробьева и О.И. Ягодкиной по статистике данных о потоках энергичных частиц с американских КА DMSP (<http://sd-www.jhuapl.edu>). Хорошая интерактивная компьютерная модель для прогноза и анализа полярных сияний, которая превышает возможности модели «OVATION Prime» [8, 9], разработана А.В. Воробьевым и Г.Р. Воробьевой [10].

Пересечение аврорального овала проявляется в экстремумах интенсивности потоков электронов, фиксируемых спектрометром бортового гелиогеофизического комплекса КА «Метеор» [7]. Границы аврорального овала связаны с различной энергией высыпаний частиц из внешнего и внутреннего

радиационных поясов Земли (хвоста магнитосферы). Центральная зона аврорального овала проявляется в повышенной плотности ионосферы [11]. Экваториальная граница ночного аврорального 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.

Спектрометры энергичных частиц регулярно пересекают авроральный 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 соответствует границам зоны экваториальной границы аврорального овала.

В числе сопутствующих решений для оценки положения магнитного полюса Земли (для модели Г.В. Старкова [6]) был разработан Способ определения положения магнитного полюса Земли [12] по данным измерений магнитных склонений в Южном океане. Эффективность способа была подтверждена в навигацию 2021 г. в трех морских экспедициях в Северном ледовитом океане, в результате которых подтвердилось, что Северный магнитный полюс находится в Российском секторе Арктики.

Зондирование аврорального овала бортовым масс-спектрометром КА

С 2005 г. на КА «DMSP-6» был установлен масс-спектрометр для исследования газового состава атмосферы. КА «DMSP-6» является аналогом КА серии «Метеор». Их орбита регулярно пересекает авроральный овал.

Накопленный архив данных зондирования концентраций ионов радиочастотными масс-спектрометрами (РИМС) на КА типа «Метеор» [13] и проект усовершенствованного РИМС в [14] позволили разработать техническое решение для зондирования аврорального овала по данным зондирования основного иона ионосферы на высотах орбиты КА «Метеор-2М». Для высоких и средних широт – это ион O^+ .

Пример типовой записи измерений $[O^+]$ в условных единицах тока представлен на рис. 1.

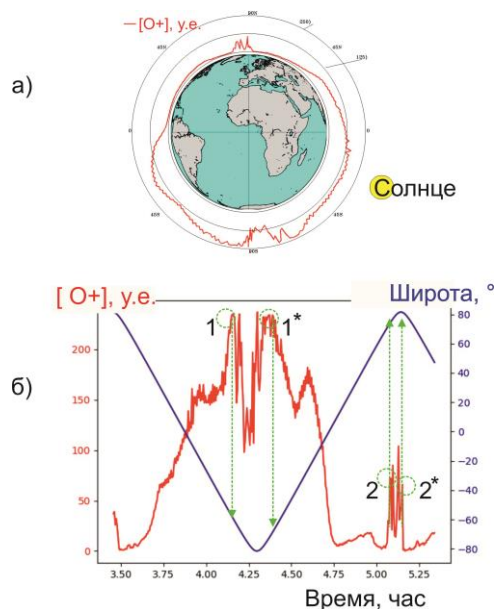


Рисунок 1. Результаты измерений концентрации иона кислорода в условных единицах за утренний виток на солнечно-синхронной орбите КА «МЕТЕОР-2М» 05.01.2022 г.

Анализаторы ионов РИМСа ориентированы навстречу ионному потоку вдоль траектории КА. Дискретность измерений 20 секунд. На ширину зоны аврорального овала при сильных магнитных бурях приходится до 5-6 измерений.

На верхнем фрагменте рис. 1 показано распределение $[O^+]$ на витке орбиты вокруг упрощенного изображения земного шара. Окружности вокруг земного шара соответствуют установленным уровням $[O^+]$ в условных единицах тока детектора. Относительная единица тока $[O^+]$ соответствует примерно 80 ионам кислорода в $см^3$. На нижнем фрагменте представлены те же данные, но в другой проекции с привязкой по широте орбиты и времени. Геомагнитная возмущенность 05.01.2022 г. была низкой, (K -индекс=1-- [15]), как и солнечная активность (по уровню излучения F10,7 см [15]).

В обширной Южной полярной шапке границы аврорального овала (1-1*) и локальный минимум в его центре проявились лучше. Это обусловлено прогревом Южного полушария. Положение Солнца показано на верхнем фрагменте. Пики $[O^+]$ внутри полярной шапки связаны также с внутренней зоной полярных сияний, которая создается суточным вращением дневной части аврорального овала [11]. Сложность морфологии Южной полярной шапки и ее большая площадь обусловлена также тем, что Южный магнитный полюс вышел с

материка в прибрежные моря и затормозился в своем движении, что соответствует концепции «геомагнитных джерков».

В зимней Северной полярной шапке концентрация иона O^+ меньше, чем в освещенной Солнцем Южной полярной шапке. Полярная шапка меньше. Поэтому и граница диффузных сияний выше полярного круга на утреннем витке выражены хуже. Но в приполюсной точке также проявился локальный минимум, обусловленный полярным ионосферным провалом.

Аномальное распределение концентрации иона кислорода над полярными шапками на рис. 1 соответствует результатам магнитоэлектродинамического и химического моделирования морфологии полярной шапки в [16] и проявлению аврорального овала в $[O^+]$. При моделировании в [16, 17] было установлено, что морфология полярной шапки зависит от магнитной активности, солнечной активности (по уровню излучения $F_{10.7}$ см), характеристик солнечного ветра, сезона. Но зона аврорального овала всегда проявляется в $[O^+]$. Поэтому, пересечение аврорального овала РИМСом проявляется в локальном экстремуме $[O^+]$. Границы авроральных овалов проявляются и в вариациях иона N^+ . Но его мало.

Интенсивность аврорального овала характеризует относительная, по сравнению с сезонными значениями, амплитуда экстремумов (1, 1*, 2, 2*). Положение середины куполообразного всплеска интенсивности $[O^+]$ на участке орбиты с повышенным уровнем повторяемости появления полярных сияний (по статистической модели и по типам сияний) будет соответствовать экваториальной границе аврорального овала. Подошва всплеска (в сторону низких широт) – границе диффузных сияний, а удаление от экваториальной границы внутрь овала в сторону локального минимума $[O^+]$ на 2-4 градуса географической широты между локальным минимумом в полярной шапке и экваториальной границей овала – приполюсной границе аврорального овала (в сторону полюса). Указанные 2-4 градуса географической широты достаточны для фиксации приполюсной границы, учитывая сложную морфологию овала по [6], особенно вблизи границ терминатора, где внутри внешнего аврорального овала проявляется слабовыраженный внутренний ночной овал.

Постоянное зондирование границ авроральных овалов позволяет использовать предыдущие данные измерений и расчетов в качестве начального приближения. Для восстановления границ вне пересечения зоны овала орбитой КА может использоваться модель (статистическая или аналитическая) аврорального овала и доступные данные зондирования.

Тенденции

Измерения плотности нейтрального состава верхней атмосферы проводились масс-спектрометрами на ряде спутников (AE-B, Ogo 6, San Marco 3, Eros A и AE-C и др.), а с 2005 г. на КА DMSP-6 и КА серии «Метеор». Для верификации измерений использовались ракетные эксперименты и радары некогерентного рассеяния (Аресибо, Хикамарка, Миллстоун и др.). Спутниковые и наземные измерения предоставляют дополнительную информацию о структуре термосферы и для зондирования аврорального овала.

Общая тенденция развития технологий зондирования аврорального овала связана с космосом. Поэтому было актуализировано восстановление и развитие научной школы космической масс-спектроскопии под руководством А.Ю.Репина (ФГБУ «ИПП»): усовершенствованный проект РИМСа [14] функционирует на КА «Метеор-2-3» и «Метеор-2-4». При этом зондируется ионная компонента верхней атмосферы, что соответствует тенденции масс-спектрометра КА DEMETER (IAP) [18], его аналога China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES) с прибором PAP [19]. Принципы масс-спектрометрии одинаковы и использованы, например, и для прибора PITMS в [20]. Анализаторы (IAP и PAP) ионов пригодны для регулярной диагностики аврорального овала, но их, обычно, выключают в зонах полярных шапок. IAP и PAP – это ионозонды, так как диагностируется концентрация ионов по орбите КА.

Потенциальные перспективы зондирования аврорального овала по проекту РАН связаны с дорогостоящими проектами авровизора. Возможны технические решения на основе зондирования других характеристик в ОКП. Например, в [21] представлена статистика границ аврорального овала, полученная на основе измерений токов и данных о магнитном поле с КА CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload) за 2000–2010 г.г. Отмечено, что границы полярных сияний практически не зависят от уровня солнечного потока ультрафиолета и от времени года. Есть ограничения на зондирование в освещенных Солнцем участках орбиты из-за ложных срабатываний приборов.

Выводы

Приведён обзор технических решений Росгидромета по зондированию авроральных овалов. Подробно рассмотрено техническое решение на основе зондирования ионного состава верхней атмосферы космическими радиочастотными анализаторами масс-спектра ионов. В анализе использовано распределение основного иона кислорода O^+ на высотах орбиты КА «Метеор», а также результаты моделирования аврорального овала по модели SIMP-2 и Г.В. Старкова.

Литература

1. Тертышников А.В. Способ зондирования границ аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Заявка № 2023111370/28(024305) от 02.05.2023 г.
2. Тертышников А.В. Способ определения положения аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Заявка № 2015126532/28(041268) от 02.07.2015 г.
3. Тертышников А.В. Результаты радиопросвечивания аврорального овала над Антарктидой сигналами ГНСС с санно-гусеничного поезда к российской антарктической станции «Восток» // Гелиогеофизические исследования, 2021. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=606>
4. Модель SIMP-2 // <http://space-weather.ru/index.php?page=raschet-sostoyaniya-ionosfery-po-modeli-simp>
5. Старков Г.В. Математическое описание границ аврорального свечения // Геомагнетизм и аэрономия, 1994, Т. 34, № 3, С. 80-86.
6. Тертышников А.В. Способ определения характеристик аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. № 2683113, Заявка 2018110604, 26.03.2018
7. Тертышников А.В., Пулинец С.А. Способ зондирования ионосферы, тропосферы, геодвижений и комплекс для его реализации. Заявл. 07.07.2011 г. № 2011128236/(07041842)
8. http://sd-www.jhuapl.edu/Aurora/ovation_live/ovationdisplay.cgi
9. <https://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast>
10. 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
11. Лазутин Л.Л. Овал полярных сияний – прекрасная, но устаревшая парадигма // Солнечно-земная физика, 2014, Т. 1, № 1, С. 23-35. DOI: 10.12737/5673
12. Тертышников А.В. Способ определения положения магнитного полюса Земли. Заявка 2020134228/28(062757) от 19.10.2020
13. Пополняемая база спутниковых данных ионного состава верхней атмосферы на высотах 808–835 км от поверхности Земли на 2010–2014 года (часть 1, 2). / Саморуков В.В., Кирюшов Б.М., Репин А.Ю. и др. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620207 (часть 1), № 2022621368 (часть 2). ФГБУ ИПГ.
14. Тертышников А.В. Масс-спектрометр космический. № 2726186. Заявка № 2019121111/20(041262) от 05.07.2019 г.
15. Space weather data // <https://celestrak.org/SpaceData/SW-Last5Years.txt>
16. Уваров В.М., Самокиш Б.А. Электрические поля в ионосфере Земли. Численные модели. – СПб: ПГУПС. 2009. 62 с.
17. Уваров В.М., Лукьянова Р.Ю. Моделирование высокоширотной ионосферы с учетом влияния параметров межпланетной среды // Гелиогеофизические исследования, 2014, Вып. 7, С. 108–118.
18. Berthelier J.J., Godefroy M., Leblanc F., Seran E., Peschard D., Gilbert P., Artru J. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER // Planetary and Space Science, V. 54, Is. 5, 2006, P. 487-501. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.018>
19. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0032063305002096>
20. Shen X., Zong Q.-G., Zhang X., Introduction to special section on the China SeismoElectromagnetic Satellite and initial results // Earth and Planetary Physics, 2: 439–443, 2018. Doi: 10.26464/epp2018041
21. PITMS: a mini mass spectrometer for the Moon / https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/PITMS_a_mini_mass_spectrometer_for_the_Moon
22. Xiong C., Lühr H., Wang H., Johnsen M.G. Determining the boundaries of the auroral oval from CHAMP field-aligned current signatures – Part 1 // Ann. Geophys., 32, 609–622, 2014. www.ann-geophys.net/32/609/2014/ Doi: 10.5194/angeo-32-609-2014