УДК 550.385.37
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-328
Orcid 0009-0005-9905-6649

НАХОЖДЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ПО ДАННЫМ МНОГОСПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Д.Д. Позднякова

Институт физики Земли имени О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Москва, Россия, d_pozdnyakova@live.ru

DETERMINATION OF THE AURORAL OVAL POSITION BASED ON MULTI-SATELLITE OBSERVATIONS

D.D. Pozdnyakova

Institute of the Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia, d_pozdnyakova@live.ru

Аннотация. Широта экваториальной границы овала полярных сияний является одним из ключевых параметров космической погоды. Вдоль овала протекает мощный ионосферный электроджет, который создает интенсивные магнитные вариации на земной поверхности, служащие источником геоиндуцированных токов в протяженных заземленных промышленных системах. В данной работе исследована возможность определения текущего положения границ аврорального овала по данным регистрации электрической компоненты шумов на низкоорбитальных спутниках Ионосфера-М. Этот метод сопоставлен с предсказаниями положения овала по моделям Ovation-Prime и APM_GEO, построенным по данным о высыпающихся электронах на спутниках DMSP, по продольным токам и интенсивности УНЧ шумов, измеренным на спутниках SWARM, и по широтному профилю магнитного возмущения от ионосферного электроджета сети IMAGE.

Ключевые слова: авроральный овал, Ионосфера-М, электроджет, геоиндуцированные токи.

Abstract. The latitude of the equatorward boundary of the auroral oval is one of the key parameters of space weather. A powerful ionospheric electrojet flows along the oval, generating intense magnetic variations at the Earth's surface that serve as a source of geomagnetically induced currents in extended grounded industrial systems. This study investigates the possibility of determining the current position of the auroral oval boundaries using measurements of the electric component of noise recorded by the low-orbit Ionosphera-M satellites. This method is compared with predictions of the oval position obtained from the OVATION Prime and APM_GEO models, which are based on data on precipitating electrons from the DMSP satellites, on field-aligned currents and ULF noise intensity measured by the Swarm satellites, and on the latitudinal profile of magnetic disturbances produced by the ionospheric electrojet from the IMAGE network.

Keywords: auroral oval, Ionosphera-M, proceedings, electrojet, geomagnetically induced currents.

ВВЕДЕНИЕ

Широта экваториальной границы полярных сияний, или аврорального овала (АО), является одним из ключевых параметров космической погоды. В спокойные геомагнитные периоды овал имеет ширину около 10° по широте, а его ночная экваториальная граница располагается вблизи 70° геомагнитной широты. Во время магнитных бурь АО расширяется, и его экваториальная граница смещается к более низким широтам. Вдоль АО протекает мощный ионосферный электроджет, создающий интенсивные магнитные вариации на поверхности Земли. Эти вариации являются источником геоиндуцированных токов (ГИТ) в протяжённых заземлённых технических системах, таких как линии электропередачи и трубопроводы, что может приводить к нарушениям их работы. Кроме того, область АО характеризуется повышенной ионосферной турбулентностью, создающей помехи для глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), увеличивая частоту потерь сигнала и ошибок позиционирования. Положение АО важно и для корректного описания динамики внешнего радиационного пояса Земли [Antonova et al., 2018]. Поэтому разработке моделей, позволяющих определять и прогнозировать положение АО, уделяется значительное внимание.

МОДЕЛИ ГРАНИЦ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА

Первые модели АО основывались на наземных фотографических наблюдениях полярных сияний [Старков, 1994]. Позднее были разработаны модели по данным ультрафиолетовых наблюдений овала со спутников POLAR и IMAGE [Chisham et al., 2022]. Одним из наиболее надёжных методов определения границ АО является регистрация потоков частиц с энергиями от 30 эВ до 30 кэВ на низкоорбитальных спутниках, позволяющая идентифицировать ионосферные проекции пограничных областей магнитосферы. Наиболее широко используемые модели основаны на многолетних наблюдениях спутников DMSP (высота орбиты около 800 км). Статистическая модель Ovation Prime (OP) параметризована параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля [Newell et al., 2009; Newell et al., 2010]. Аналогичная Aurora Precipitation Model (APM) разработана в Полярном геофизическом институте и параметризована геомагнитными индексами Dst и AL [Vorobjev et al., 2013]. Поскольку АО представляет собой динамическую систему, чувствительную к процессам в магнитосфере и ионосфере, его положение не может быть полностью описано только межпланетными или геомагнитными параметрами. Поэтому исследование динамики АО

требует привлечения различных типов спутниковых и наземных наблюдений.

В данной работе рассматривается динамика границ аврорального овала по данным измерений продольных токов на низкоорбитальных спутниках сети SWARM.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ

Ионосферная проекция трёхмерной системы продольных токов состоит из пары слоёв, вытянутых приблизительно вдоль магнитной широты: R1 и R2, с противоположными направлениями тока в утреннем и вечернем секторах местного времени в области АО. Продольный ток R1 втекает в ионосферу и вытекает из ионосферы на утренней и вечерней сторонах, соответственно. Крупномасштабные (> 150 км) плотности тока обычно составляют единицы мкА/м2, а мгновенные мелкомасштабные продольные токи могут достигать нескольких сотен мкА/м2 [Neubert and Christiansen, 2003]. Структуры меньшего масштаба часто связаны с дугами полярных сияний, которые сопровождаются возмущениями ионосферной проводимости и электрического поля [Aikio et al., 2002; Juusola et al., 2016]. В вечернем (утреннем) секторе наблюдается нисходящий продольный ток, направленный к экватору (полюсу) дуги, и восходящий продольный ток над дугой. Эти две области продольных токов соединены горизонтальным током, направленным к полюсу (экватору).

Основным модулем миссии SWARM являются высокочувствительные векторные и скалярные магнитометры для определения величины и направления полного вектора и вариаций магнитного поля с точностью более 0,5 нТл. Магнитометры позволяют проводить измерения вариаций магнитного поля, создаваемого продольными токами. С одного космического аппарата плотность ПТ можно оценить на основе одной магнитной компоненты с помощью метода, использующего закон Ампера, в предположении о геометрии бесконечного токового слоя и ортогональном пересечении токового слоя [Christiansen et al., 2002]. Метод оценки с двумя спутниками рассчитывает плотность тока по rot(B), измеренному квазиодновременно в четырёх точках, адаптированных для данных SWARM-A и SWARM-C, где измерения, разнесённые вдоль траектории, используются для создания «тетраэдра» [Ritter and Lühr, 2006]. Метод rot(B) обеспечивает более надёжные оценки плотности тока, поскольку не требует каких-либо предположений о геометрии и ориентации тока. Результаты ПТ, полученные как с двумя спутниками, так и с одним спутником, считаются достаточно согласованными [Ritter et al., 2013]. Оба алгоритма автоматически генерируются центром обработки данных ЕКА по мере поступления входных данных. Значения плотности FAC за 1 с (частота дискретизации 1 Гц) доступны на онлайн-портале данных Swarm (ftp://swarm-diss.eo.esa.int) в качестве продуктов уровня L2.

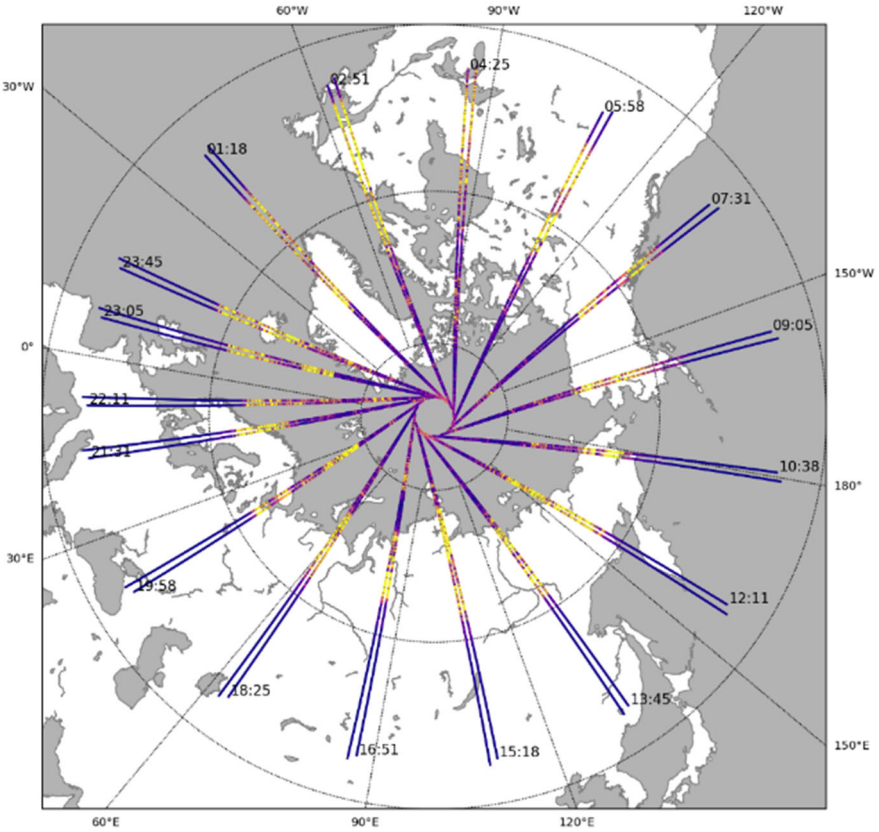

Рис. 1. Распределение модуля амплитуды ПТ для каждого из пары спутников SWARM-A и -C, разнесенных на ~1° по долготе, для интервала времени с 22:00 UT 2025/09/14 до 23:45 UT 2025/09/15.

Для анализа мы выбрали бурю 14–15 сентября 2025 г. умеренной интенсивности (Dst~-75 нТл) со слабой суббуревой активностью (AL<-1000 нТл). Буря началась около 18 UT 14 сентября и длилась до конца дня 15 сентября 2025 г. Индекс Dst упал до -75 нТл около 2 UT 15 сентября. На фоне бури наблюдалась суббуря примерно с 23 UT 14 сентября по 2 UT 15 сентября, в ходе которой индекс AL падал до -1048 нТл, а также умеренная суббуря с 7:30 – 09 UT 15 сентября, когда AL падал до -925 нТл.

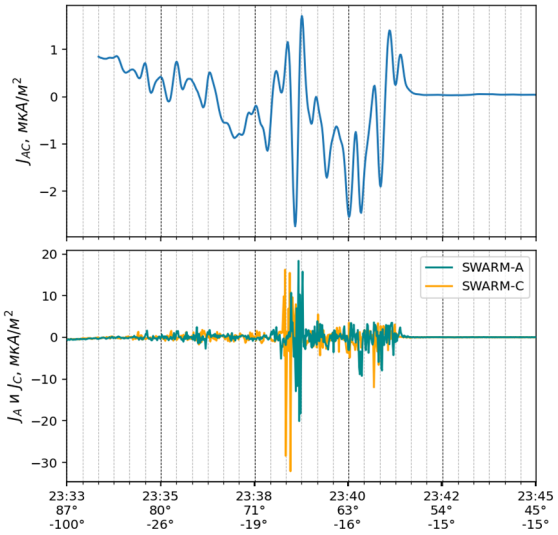

Рис. 2. ПТ, рассчитанный по данным пары спутников SWARM-A и SWARM-C (сверху) и каждого из модулей отдельно (снизу) для интервала времени с 23:33 до 23:45 UT 2025/09/14.

Мы рассмотрели 17 совместных пролетов спутников SWARM-A и -C (модули разнесены на ~1° по долготе) над Северным полушарием (рис. 1) для интервала времени с 22:00 UT 2025/09/14 до 23:45 UT 2025/09/15. Все приполярные сегменты орбит спутников проходят через дневной овал, пересекают терминатор, после чего слегка задевают ночной овал. При этом можно рассматривать как более крупномасштабный ПТ, рассчитанный с помощью пары спутников, так и мелкомасштабный, рассчитанный для каждого космического аппарата в отдельности (рис. 2).

Для оценки и сравнения широтных границ АО мы также использовали модели АРМ и АРМ_ГЕО, разработанные в Полярном геофизическом институте (ПГИ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнено исследование динамики экваториальной границы аврорального овала в период магнитной бури 14–15 сентября 2025 г. (Dst≈−75 нТл) по данным измерений продольных токов спутников SWARM-A и SWARM-C. Показано, что как крупномасштабные, так и мелкомасштабные оценки ПТ позволяют выделять широтное положение границ овала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Старков Г.В. Авроральный овал — важнейший элемент магнитосферно-ионосферной связи // Геомагнетизм и аэрономия. 1994. Т. 34, № 3. С. 3–16.

Aikio A.T., Lakkala T., Kozlovsky A., Williams P.J.S. Electric fields and currents in the auroral E region associated with auroral arcs // Annales Geophysicae. 2002. Vol. 20, No. 6. P. 783–793.

Antonova E.E., Stepanova M.V., Moya P.S., Pinto V.A., Vovchenko V.V., Ovchinnikov I.L., Sotnikov N.V. Processes in auroral oval and outer electron radiation belt // Earth, Planets and Space. 2018. Vol. 70. 127. DOI: 10.1186/s40623-018-0898-1.

Chisham G., Burrell A.G., Thomas E.G., Chen Y.-J. Ionospheric boundaries derived from auroral images // Journal of Geophysical Research. 2022. Vol. 127, No. 7. e2022JA030622. DOI: 10.1029/2022JA030622.

Christiansen F., Papitashvili V.O., Neubert T. Field-aligned currents in the dayside cusp and polar cap // Journal of Geophysical Research. 2002. Vol. 107, No. A9. 1225. DOI: 10.1029/2001JA009207.

Juusola L., Archer W.E., Kauristie K., Burchill J.K., Vanhamäki H., Aikio A.T. Ionospheric conductances and currents of a morning sector auroral arc from Swarm electric field and magnetic field measurements // Geophysical Research Letters. 2016. Vol. 43, No. 23. P. 11937–11945.

Neubert T., Christiansen F. Small-scale field-aligned currents // Space Science Reviews. 2003. Vol. 108, No. 1–2. P. 115–122.

Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Diffuse, monoenergetic, and broadband aurora: The global precipitation budget // Journal of Geophysical Research. 2009. Vol. 114. A09207. DOI: 10.1029/2009JA014326.

Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora // Journal of Geophysical Research. 2010. Vol. 115. A03216. DOI: 10.1029/2009JA014805.

Ritter P., Lühr H. Curl-B technique applied to Swarm constellation for determining field-aligned currents // Earth, Planets and Space. 2006. Vol. 58, No. 4. P. 463–468.

Ritter P., Lühr H., Rauberg J. Determining field-aligned currents with the Swarm constellation mission // Earth, Planets and Space. 2013. Vol. 65, No. 11. P. 1285–1294.

Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Katkalov Y. Auroral precipitation model and its applications to ionospheric and magnetospheric studies // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. Vol. 102. P. 157–171. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.05.0