УДК 550.385

СРАВНЕНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРОДОЛЬНЫХ ТОКОВ И ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ ПО ДАННЫМ ТЕХНИКИ ИНВЕРСИИ МАГНИТОГРАММ И IMAGE FUV ДЛЯ СУББУРИ 27 АВГУСТА 2001 г.

В.Э. Капустин, С.Б. Лунюшкин, В.В. Мишин, Ю.В. Пенских

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия kapustin@iszf.irk.ru

COMPARISON OF FIELD-ALIGNED CURRENTS AND AURORA DISTRIBUTION IN THE IONOSPHERE FROM MAGNETOGRAM INVERSION TECHNIQUE AND IMAGE FUV DATA FOR THE 27 AUGUST 2001 SUBSTORM

V.E. Kapustin, S.B. Lunyushkin, V.V. Mishin, Yu.V. Penskikh

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia kapustin@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлено сравнение крупномасштабных пространственных распределений продольных токов (ПТ), полученных на основе техники инверсии магнитограмм по наземным магнитометрам, с положением и яркостью аврорального овала по изображениям IMAGE FUV на ночной стороне для изолированной суббури 27 августа 2001 г. Количественно-качественный анализ показал, что полярная граница аврорального овала по данным IMAGE FUV на протяжении всей суббури наиболее близко соотносится с границей обращения (reversal boundary) ионосферной конвекции RB (максимумами плотности ПТ зоны 1 Ииджимы—Потемры) в вечернем и утреннем секторах MLT. Дополнительно показано, что области вытекающих ПТ хорошо согласуются ($\Delta \theta \sim 2^{\circ}$) с областями ярких полярных сияний на протяжении всей суббури.

Ключевые слова: авроральный овал, полярная шапка, продольные токи, граница обращения конвекции.

Abstract. A comparison is made of large-scale spatial distributions of field-aligned currents (FACs) obtained from groundbased magnetometers by magnetogram inversion technique (MIT), with the position and brightness of the auroral oval from the night side IMAGE FUV images for the 27 August 2001 isolated substorm. Qualitative–quantitative analysis showed that the auroral oval polar boundary, according to IMAGE FUV data, throughout the entire substorm most closely correlate with the ionospheric convection reversal boundary RB (the FAC density maximum in Iijima—Potemra zone 1) in the dusk and dawn MLT sectors. In addition, it is shown that the regions of upward FACs are in good agreement ($\Delta\theta \sim 2^\circ$) with the regions of bright auroras throughout the entire substorm.

Keywords: auroral oval, polar cap, field-aligned currents, convection reversal boundary.

введение

Авроральный овал (АО) представляет собой область наиболее частого появления полярных сияний в зените в фиксированный момент мирового времени, т. е. расположения полярных сияний над поверхностью Земли в области, ориентированной определенным образом относительно направления на Солнце [Фельдштейн, 2016]. В топологии магнитосферы АО в каждом полушарии представляет собой ионосферную проекцию плазменного слоя и имеет полярную и экваториальную границы, на которых наблюдается резкое уменьшение энергии и потока высыпающихся из плазменного слоя электронов и ионов.

Одной из ключевых границ АО для исследования была выбрана полярная граница — граница полярной шапки, окружающая околополюсную область, где силовые линии геомагнитного поля считаются открытыми по отношению к межпланетному магнитному полю (ММП). Динамика этой области имеет фундаментальное значение, так как изменение ее размеров свидетельствует о накоплении и высвобождении магнитной энергии в долях хвоста магнитосферы во время суббури [Brittnacher et al., 1999].

Хорошо известно, что магнитосферно-ионосферное взаимодействие обеспечивается постоянно существующими продольными токами (ПТ) зон 1 и 2 Ииджимы—Потемры в области АО. ПТ зоны 1 формируются в низкоширотном пограничном слое (НПС) магнитосферы, где скорость ее обтекания (соответствующая антисолнечной конвекции) перпендикулярна геомагнитному полю. При этом внутренняя граница НПС соответствует в ионосфере границе обращения конвекции (RB), что принято в качестве базового положения метода диагностики границ АО на основе техники инверсии магнитограмм (ТИМ) [Лунюшкин, Пенских, 2019].

Целью данного исследования является сравнение границы обращения конвекции, полученной геомагнитным методом диагностики границ АО на основе ТИМ, с полярной границей АО по данным IMAGE FUV для суббури 27 августа 2001 г.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Изолированная магнитосферная суббуря 27 августа 2001 г. отмечалась в 03:00–06:00 UT, ее геомагнитная обстановка представлена на рис. 1.

Для исследования суббури использовался метод диагностики границ АО на основе ТИМ. Этот метод обеспечивает расчет двумерных распределений эквивалентных токов, электрического потенциала, горизонтальных токов, ПТ и других электродинамических параметров высокоширотной ионосферы на основе одноминутных данных непрерывных геомагнитных измерений на мировой сети наземных станций. Кроме того, геомагнитный метод позволяет определить основные границы АО, в том числе и базовую границу RB. Физические положения, теория и базовый алгоритм геомагнитного метода подробно



Рис. 1. Графики изменения авроральных *SME*-индексов (*a*), *B*₂-компоненты ММП (б) и магнитных потоков (*в*) через полярные шапки Северного (синяя кривая) и Южного (красная кривая) полушарий в ходе суббури 27.08.2001

изложены в работах [Лунюшкин, Пенских, 2019; Пенских et al., 2021].

Во время рассматриваемой суббури проводились наблюдения полярных сияний в дальнем ультрафиолете (FUV) с космического спутника IMAGE. Для нашего исследования были доступны изображения с камеры WIC [https://supermag.jhuapl.edu], в диапазоне 140–180 нм спектра Лаймана—Бирджа—Хопфилда (LBH). Спектральный диапазон камеры WIC наиболее чувствителен к линии азота N₂ в верхней атмосфере Земли [Mende et al., 2003].

Программный комплекс IZMAP специально разработан для исследования геомагнитных изображений. Оператор на дисплее монитора вручную проводит границы на изображениях в геомагнитной системе координат. Отсчет кошироты выполняется в диапазоне 0°–40° с шагом 1°, а отсчет долготы (местного геомагнитного времени MLT) производится от меридиана полдень—полночь в диапазоне 0°– 350° с шагом 10°.

РЕЗУЛЬТАТЫ

При использовании программного комплекса IZMAP по снимкам спутника IMAGE FUV для суббури 27 августа 2001 г. в интервале 03:00-05:00 UT (с шагом 2 мин) были проведены вручную границы аврорального овала на ночной стороне и нанесена граница RB, определенная по картам ПТ на основе ТИМ. Визуальное сравнение по двум методам границ по всем 50 моментам суббури позволяет сделать вывод о том, что полярная граница IMAGE и граница RB в основном соответствуют друг другу. На рис. 2 приведены примеры, показывающие хорошее качественное совпадение этих границ.

Количественное сравнение полярной границы АО, полученной по данным IMAGE и границы RB, полученной на основе ТИМ, было выполнено с помощью графических методов анализа данных, объединяющего все 50 моментов времени, при этом было выполнено разделение меридианом полдень полночь на две статистические выборки значений коширот — утро и вечер. Результаты сравнения приведены на рис. 3, *a* и 3, *б*. Видно, что две границы согласуются между собой с коэффициентом корреляции 0.7 и 0.5 соответственно для утреннего и вечернего секторов.

В дополнение к полученному результату мы сравнили местоположения максимальной яркости свечений сияний в АО на картах IMAGE с местоположениями вытекающих ПТ на картах, рассчитанных по ТИМ. В литературе опубликовано уже достаточно много эмпирических данных, подтверждающих тот факт, что вытекающий ПТ совпадает с высыпающимися электронами (например, [Korth et al., 2014; Carter et al., 2016]). Последние результаты связаны в основном со статистическим распределением ПТ, а в ранних работах не так много одновременных наблюдений во время суббури или бури.

Для сравнения вытекающего ПТ с яркостью АО была проведена линия максимума яркости сияний АО на протяжении всей суббури 27 августа 2001 г. в 03:00–05:00 UT. Несмотря на сложность структуры вытекающих ПТ и динамики изменения авроральных сияний, количественное сравнение показало, что линия максимума яркости сияний согласуется с линией максимума плотности вытекающего ПТ со значащим коэффициентом корреляции 0.6 (рис. 3, *в*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в настоящей работе.

1. Граница обращения магнитосферно-ионосферной конвекции RB хорошо соответствует полярной границе AO (границе полярной шапки) на ночной стороне для рассмотренной суббури 27 августа 2001 г. Этот результат обсуждался ранее в статье [Пенских et al., 2021].

2. Положение линии максимума плотности вытекающих ПТ по данным ТИМ совпадает с точностью



Рис. 2. Верхняя панель: изображения полярных сияний по данным IMAGE FUV; красные линии — полярная и экваториальная границы АО. Штриховая белая линия — граница RB, полученная с помощью ТИМ. Нижняя панель: распределения плотности ПТ по данным ТИМ. Красные изолинии — вытекающий ПТ, черные — втекающий ПТ, сплошные синие линии — границы R0, R1, R2 ПТ зон 1 и 2 Иджимы—Потемры; штриховая синяя линия — граница RB



Рис. 3. Статистическое сравнение полярной границы АО по снимкам IMAGE и границы RB по данным ТИМ для секторов утро (*a*) и вечер (δ); линия максимума яркости сияний и линия максимума плотности вытекающего ПТ (*в*). По осям абсциес и ординат — кошироты соответствующих границ. Оценки абсолютной Δ и относительной погрешностей δ и коэффициента корреляции *r* указаны на графика

 $\Delta\theta \sim 2^{\circ}$ (два шага расчетной сетки по широте) с линией максимальной яркости сияний в АО на снимках IMAGE. Полученный результат согласуется с имеющимися в литературе статистическими результатами соответствия областей крупномасштабных вытекающих ПТ и полярных сияний.

Авторы благодарят А.В. Тащилина за интересные дискуссии и полезные замечания при обсуждении основных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Лунюшкин С.Б., Пенских Ю.В. Диагностика границ аврорального овала на основе техники инверсии магнитограмм. *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5, № 2. С. 97–113. DOI: 10.12737/szf-52201913.

Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б., Капустин В.Э. Геомаг-

нитный метод автоматической диагностики границ авроральных овалов в двух полушариях Земли. Солнечноземная физика. 2021. Т. 7, №. 2. С. 63–76. DOI: 10.12737/szf-72202106.

Фельдштейн Я.И. Открытие и первые исследования аврорального овала (обзор). *Геомагнетизм и аэрономия*. 2016. Т. 56, № 2. С. 139–153. DOI: 10.7868/S00167940160 20048.

Brittnacher M., Fillingim M., Parks G., et al. Polar cap area and boundary motion during substorms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1999. Vol. 104, no. A6. P. 12251–12262. DOI: 10.1029/1998ja900097.

Carter J.A., Milan S.E., Coxon J.C., et al. Average fieldaligned current configuration parameterised by solar wind conditions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2016. Vol. 121, no. 2. P. 1294–1307. DOI: 10.1002/2015ja021567.

Korth H., Zhang Y., Anderson B.J., et al. Statistical relationship between large-scale upward field-aligned currents

Сравнение ионосферных распределений продольных токов и полярных сияний по данным техники инверсии магнитограмм и IMAGE FUV для суббури 27 августа 2001 г.

and electron precipitation. J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. Vol. 119, no. 8. P. 6715–6731. DOI: 10.1002/2014ja019961. Mende S.B., Carlson C.W., Frey H.U., et al. IMAGE FUV and in situ FAST particle observations of substorm aurorae. J. Geophys. Res.: Space Phys. 2003. Vol. 108, no. A4. DOI: 10.1029/2002JA009413. URL: https://supermag.jhuapl.edu.