

СТРУКТУРА НОЧНОЙ МАГНИТОПАУЗЫ ЗЕМЛИ

^{1,2}А.С. Лукин, ^{1,3}А.В. Артемьев, ⁵Е.В. Панов, ¹А.А. Петрукович, ^{1,4}Е.В. Юшков

¹Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
as.lukin.phys@gmail.com

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США

⁴Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁵Институт космических исследований Австрийской академии наук, Грац, Австрия

EARTH NIGHT-SIDE MAGNETOPAUSE STRUCTURE

^{1,2}A.S. Lukin, ^{1,3}A.V. Artemyev, ⁵E.V. Panov, ¹A.A. Petrukovich, ^{1,4}E.V. Yushkov

¹Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia
as.lukin.phys@gmail.com

²National Research University, Higher School of Economics, Moscow, Russia

³University of California, Los Angeles, California, USA

⁴Moscow State University, Moscow, Russia

⁵Space Research Institute of Austrian Academy of Sciences, Austria, Graz

Аннотация. В докладе рассматривается несколько временных интервалов одновременных (собранных в течение одного орбитального периода) наблюдений границы земной магнитосферы — магнитопаузы спутниковыми миссиями MMS и ARTEMIS. Анализ собранных спутниковых данных позволяет описать различия в структуре магнитопаузы, наблюдаемой на разных радиальных расстояниях от Земли. Используя односпутниковые методы анализа данных, показано, что градиенты магнитного поля и плазменных характеристик (ионной температуры, плотности плазмы и ионной потоковой скорости) могут иметь различные масштабы для магнитопаузы, наблюдаемой в ближнем, среднем и дальнем хвосте магнитосферы, и, кроме того, величины этих градиентов, как правило, больше на больших радиальных расстояниях.

Ключевые слова: магнитосфера, магнитопауза, спутниковые наблюдения.

Abstract. We have analyzed several intervals of data collected simultaneously (during one orbital period) by four MMS and two ARTEMIS probes crossing the night-side magnetopause – the boundary of the Earth magnetosphere. This analysis reveals several features and shows differences of the magnetopause structure observed on different radial distances from the Earth. Using single-spacecraft methods, we have shown that gradients of magnetic field and plasma characteristics (ion temperature, plasma density and ion bulk velocity) can have different scales on the orbits of MMS (the near-Earth magnetotail) and ARTEMIS (the distant magnetotail) probes and magnitudes of these gradients are often smaller in the distant magnetotail.

Keywords: magnetosphere, magnetopause, spacecraft observations.

ВВЕДЕНИЕ

Плазменная оболочка Земли — ее магнитосфера заполнена заряженными частицами плазмы солнечного ветра и ионосферного происхождения. Одним из наиболее важных источников магнитосферной плазмы является солнечный ветер, частицы которого проникают в магнитосферу через ее границу — магнитопаузу. Механизмы проникновения зависят от конфигурации магнитопаузы, определяемой комбинацией локально сгенерированных магнитных полей и магнитного поля земного диполя. Поскольку характеристики плазмы и магнитного поля изменяются при увеличении радиального расстояния от планеты, структура магнитопаузы, а значит и механизмы проникновения через нее плазмы, так же могут меняться. Поэтому важно рассмотреть вопрос о различиях в структуре и пространственном масштабе ночной магнитопаузы на различных радиальных расстояниях от Земли. Для этой цели мы используем два спутника миссии Acceleration, Reconnection, Turbulence, and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun (ARTEMIS) [Angelopoulos, 2008, 2010], вращающихся вокруг Луны, и четыре спутника миссии Magnetospheric Multiscale (MMS) [Fuselier et al., 2014; Burch et al., 2016], орбита которых позволяет исследовать структуру магнитопаузы на расстояниях порядка 20 земных радиусов от планеты.

Мы отбираем временные интервалы, когда аппараты обеих миссий по несколько раз пересекают магнитопаузу (см. пример на рис. 1) и затем рассматриваем статистические результаты, полученные из обработки собранных спутниковых данных.

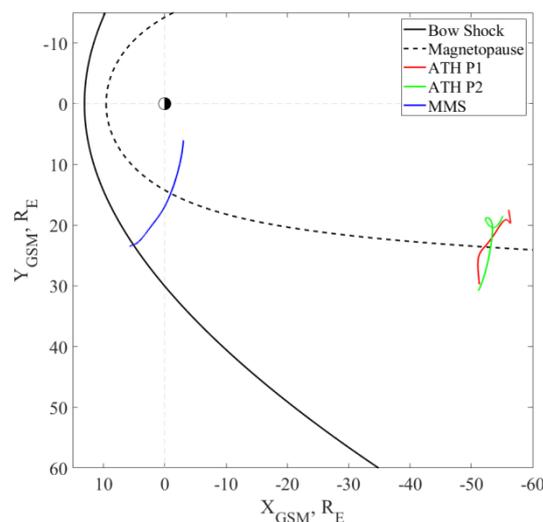


Рис. 1. Конфигурация орбит миссий MMS и ARTEMIS в плоскости XY системы координат GSM за 2 ноября 2017 г. Множественные пересечения магнитопаузы регистрируются как на аппаратах MMS, так и на ARTEMIS

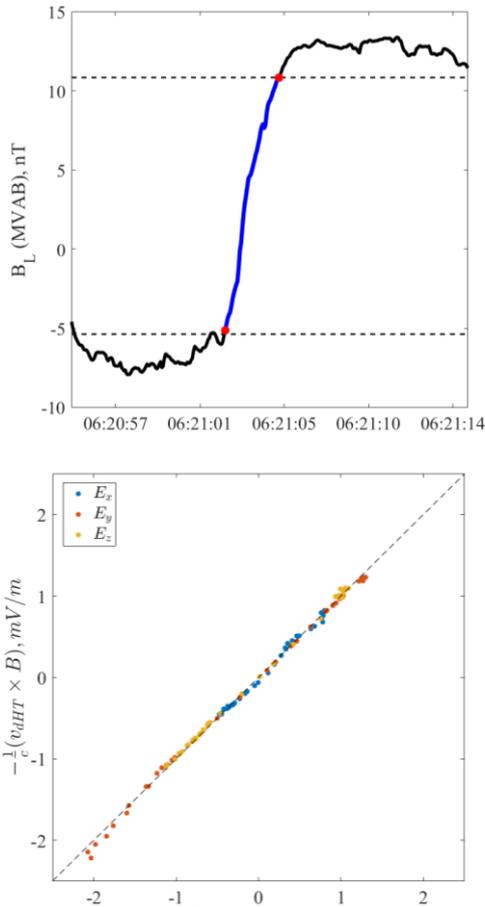


Рис. 2. Сверху — пример определения толщины токового слоя магнитопаузы по данным спутника MMS1. Снизу — проверка метода ДеХоффманна-Теллера

ОДНОСПУТНИКОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ

Общей проблемой экспериментальной физики космической плазмы является определение ориентации и скорости движения различных разрывов, например, магнитопаузы. Чаще всего, необходимо знать нормаль к поверхности разрыва и его скорость вдоль нормали. В нашей работе мы используем четыре одно-спутниковых метода: вариационный анализ вектора магнитного поля (MVAB) [Sonnerup, Scheible, 1998; Sonnerup et al., 2006], анализ ДеХоффманна-Теллера (dHT) [Khrabrov, Sonnerup, 1998], минимизацию отклонения от закона Фарадея (MFR) [Khrabrov, Sonnerup, 1998; Sonnerup et al., 2006] и композиционный метод (COM) [Sonnerup et al., 2006]. Первый метод позволяет получить локальную систему координат изучаемого разрыва (система координат LMN), второй позволяет оценить скорость движения разрыва, а используя третий и четвертый методы, мы можем сразу найти как необходимую систему координат, так и скорость разрыва. Все методы сводятся к применению метода наименьших квадратов и задаче на собственные значения.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЛЩИНЫ МАГНИТОПАУЗЫ

Чтобы определить пространственный масштаб магнитопаузы, зная ее скорость, нужно найти ин-

тервал времени, соответствующий переходу через границу. Существует несколько общепринятых методов определения толщины [Haaland et al., 2004, 2014], два из которых заключаются в следующем:

- аппроксимация наблюдаемого профиля физической величины (например, магнитного поля) аналитической функцией $y = a + b \tanh\left(\frac{x - x_0}{L}\right)$;
- выбор интервала времени, на котором происходит 76 % изменения рассматриваемой величины.

Оба метода в среднем дают одну и ту же оценку пространственного масштаба, однако второй метод не требует контроля процедуры аппроксимации и начальных приближений для коэффициентов аппроксимации, поэтому в работе мы используем именно его. Пример определения толщины токового слоя магнитопаузы и проверки метода ДеХоффманна-Теллера приведен на рис. 2.

СТАТИСТИКА ТОЛЩИН ТОКОВОГО СЛОЯ МАГНИТОПАУЗЫ

Всего было отобрано 75 пересечений магнитопаузы по данным миссии MMS и 110 событий по данным ARTEMIS. Гистограммы распределения пространственных масштабов переходных слоев (толщин) представлены на рис. 3. В работе мы рассматривали толщину токового слоя (профиль магнитного поля) и пограничные слои по температуре, плотности и потоковой скорости. Распределения во многом похожи, однако средние значения немного больше на лунной орбите, где измерения проводили спутники ARTEMIS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что распределения толщин токового слоя и пограничных слоев по плазменным харак-

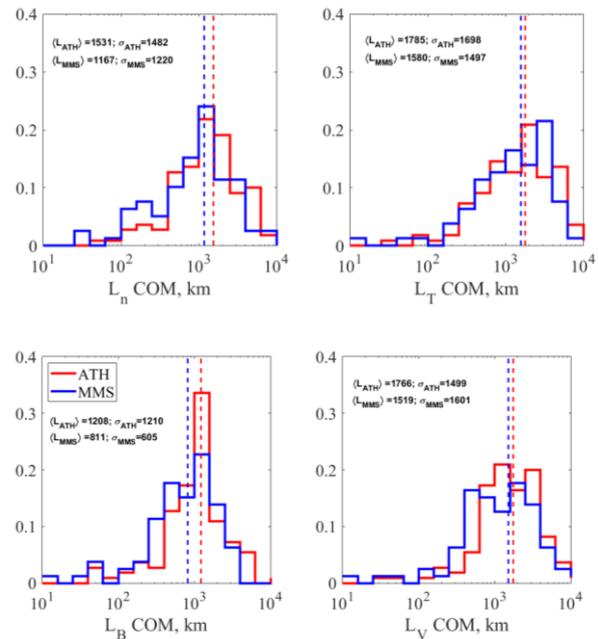


Рис. 3. Гистограммы распределений толщин токового слоя и переходных областей по ионной потоковой скорости, плотности плазмы и ионной температуре

характеристикам, полученные по данным миссий MMS (ближний хвост) и ARTEMIS (орбита Луны, дальний хвост), в целом похожи, средние значения абсолютных значений пространственных масштабов переходных областей на лунной орбите больше, чем в ближнем хвосте, т. е. наблюдается утолщение магнитопаузы и пограничного слоя с увеличением радиального расстояния от Земли.

Работа А.С. Лукина и Е.В. Юшкова выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00218.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Angelopoulos V. The THEMIS Mission // Space Sci. Rev. 2008. V. 141. P. 5.
- Angelopoulos V. The ARTEMIS Mission // Space Sci. Rev. 2010. V. 165. P. 3.
- Burch J.L., Moore T.E., Torbert R.B., Giles B.L. Magnetospheric Multiscale Overview and Science Objectives // Space Sci. Rev. 2016. V. 199. P. 5.
- Fuselier S.A., et al. Magnetospheric multiscale science mission profile and operations // Space Sci. Rev. 2014. V. 199. P. 77–103. DOI: [10.1007/s11214-014-0087-x](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0087-x).
- Sonnerup B.U., Scheible M. Minimum and Maximum Variance Analysis in Analysis Methods for Multispacecraft Data, ISSI Sci. Rep. SR-001. 1998. P. 185.
- Sonnerup B.U., Haaland S., Paschmann G., et al. Orientation and motion of a plasma discontinuity from single-spacecraft measurements: Generic residue analysis of Cluster data // J. Geophys. Res. 2006. V. 111. A05203.
- Khrabrov A.V., Sonnerup B.U.O. DeHoffmann-Teller Analysis in. Analysis Methods for Multispacecraft Data, ISSI Sci. Rep. SR-001. 1998. P. 221.
- Khrabrov A.V., Sonnerup B.U.O. Orientation and motion of current layers: Minimization of the Faraday residue // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25. P. 2373–2376.
- Haaland S., Reistad J., Tenfjord P., et al. Characteristics of the flank magnetopause: Cluster observations // J. Geophys. Res. 2014. V. 119. P. 9019–9037.
- Haaland S., et al. Four-spacecraft determination of magnetopause orientation, motion and thickness: comparison with results from single-spacecraft methods // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 1347–1365.