УДК 533.95 DOI: 10.62955/0135-3748-2024-238

ВЫПОЛНИМОСТЬ УСЛОВИЯ ВМОРОЖЕННОСТИ В МАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ: АНАЛИЗ ДАННЫХ THEMIS-A

Д.А. Шубин, А.В. Рубцов, П.Н. Магер, Д.Ю. Климушкин

Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, d.shubin@iszf.irk.ru

IMPLEMENTATION OF THE FROZEN-IN CONDITION IN MAGNETOSPHERIC DISTURBANCES: ANALYSIS OF THEMIS-A DATA

D.A. Shubin, A.V. Rubtsov, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin

Institute of Solar-Terrestrial Physics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia, d.shubin@iszf.irk.ru

Аннотация. В работе было проведено статистическое исследование выполнимости условия вмороженности плазмы в магнитное поле. Это условие, являющееся фундаментальным в магнитной гидродинамике и физике космической плазмы, может быть записано в виде $E = -u \times B$, где E — электрическое поле, u — скорость потока частиц B — магнитное поле. Для проверки этого условия были использованы данные зонда А миссии THEMIS за март 2017 г. В ходе анализа были обнаружены случаи, когда E совпадает с $-u \times B$ как по фазе, так и по амплитуде, однако чаще наблюдаются случаи, когда этого совпадения нет. Таким образом, применять условие вмороженности при исследовании возмущений в магнитосфере следует с осторожностью, поскольку вероятной причиной несовпадения может являться большая значимость кинетических факторов.

Ключевые слова: магнитосферная плазма, условие вмороженности, THEMIS.

Abstract. In this study, we conducted a statistical study of plasma frozen-in condition in a magnetic field. This phenomenon, which is essential in magnetic hydrodynamics and cosmic plasma physics, is represented by the equation $E = -u \times B$, where E represents the electric field, u represents the particle flow velocity, and B represents the strength of the magnetic field. We used data from the March 2017 probe A of the THEMIS mission to examine this phenomenon. Subsequently, analysis revealed that there were instances where the E corresponded with the $-u \times B$ component in both phase and magnitude, although this was not consistently the case. Consequently, caution must be exercised when applying the plasma frostbite assumption to investigations of disturbances within the magnetosphere, given that significant kinetic factors may influence outcomes.

Keywords: magnetospheric plasma, freezing condition, THEMIS

ВВЕДЕНИЕ

Исследование магнитосферный возмущений (в том числе ультранизкочастотных (УНЧ) волн) является одним из ключевых направлений в физике космической плазмы. Теоретическим базисом исследования магнитосферных возмущений является магнитная гидродинамика, одним из основных уравнений которой является условие вмороженности:

$$E = -u \times B, \quad (1)$$

где E — электрическое поле, u — скорость потока частиц B — магнитное поле. Это условие предполагает, что магнитные силовые линии «вморожены» в плазму и движутся вместе с ней [Alfvén, 1943]. Условие вмороженности считается следствием высокой проводимости космической плазмы [Gordeev et al., 2017].

Предыдущие исследования выполнимости условия вмороженности были достаточно эпизодическими и не позволили прийти к окончательному выводу: различные исследователи предоставляли аргументы как в пользу, так и против универсальной выполнимости этого условия [Lui, 2015]. Ввиду принципиальной важности этого условия в физике космической плазмы представляет большой интерес его комплексная проверка. Для решения этой задачи необходимо использовать данные космических аппаратов, поскольку они предоставляют данные как по электрическому и магнитному полю, так и по скорости частиц.

ДАННЫЕ И ИНСТРУМЕНТЫ

В рамках текущего исследования были использованы данные за март 2017 г. по зонду А многоспутниковой миссии Time History of Events and Macroscale Interactions during Substorms (THEMIS) [Angelopoulos, 2008], полученные из открытого источника CDAWeb (https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/). В рассматриваемый период времени спутник находился в предполуночном регионе и смещался в сторону вечернего сектора, что соответствует интервалу местного магнитного времени (MLT) с 20 до 22 часов (рис. 1).

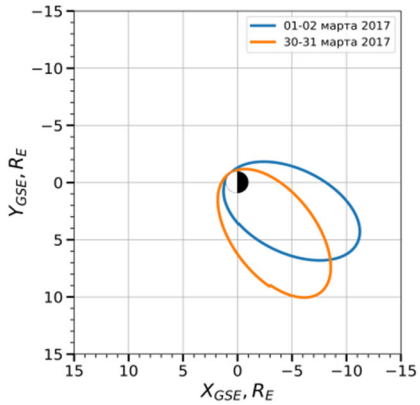

Рис. 1. Траектории движения спутника THEMIS-A в проекции на плоскость X–Y (GSE) на начало и конец марта 2017 г. MLT изменялся от 22 до 20 часов

Для проверки условия вмороженности плазмы было необходимо провести анализ на тех временных интервалах, для которых одновременно доступны значения как электрического [Bonnell et al., 2008] и магнитного [Auster et al., 2008] поля, так и скорости ионов [McFadden et al., 2008].

Среди магнитосферных возмущений большую роль играют волны Pc4-Pc5 (период 45–600 с), поэтому чтобы перейти к анализу полученных интервалов, необходимо избавится от постоянных составляющих E и $-u \times B$. Для этого был использован метод скользящего среднего с окном в 40 мин. Чтобы избавится от высокочастотных флуктуаций был повторно применён метод скользящего среднего, но уже с окном в 45 с. Так как в ходе работы метода теряется часть данных равная размеру окна, то для анализа использовались временные интервалы продолжительностью от одного часа.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВМОРОЖЕННОСТИ

Чтобы определить выполнимость вмороженности плазмы, введём параметр H:

$$H = \frac{|E|^2 - |v \times B|^2}{|E|^2 + |v \times B|^2} \quad (2)$$

Параметр H позволяет оценить на сколько отличаются между собой суммарные значения по трём компонентам E и $-u \times B$. Он принимает значения в интервале $(-1; 1)$, где значения близкие к 1 говорят об преобладании E над $-u \times B$, и наоборот если значение близко к –1. Если параметр $H \sim 0$ это говорит о схожести в фазе и амплитуде колебаний между исследуемыми величинами, что подтверждает выполнимость условия (1).

Среди проанализированных временных интервалов были случаи, для которых средний параметр H_{avg} принимал значения близкие к 0. Так, например на рис. 2 можно заметить хорошую корреляцию между E и $-u \times B$, для этого интервала $H_{avg} = 0.343$. Что говорит о значительной выполнимости условия (1). Однако чаще наблюдались случаи, когда нельзя говорить о том, что условие вмороженности выполняется, как на рис. 3, для которого $H_{avg} = 0.778$.

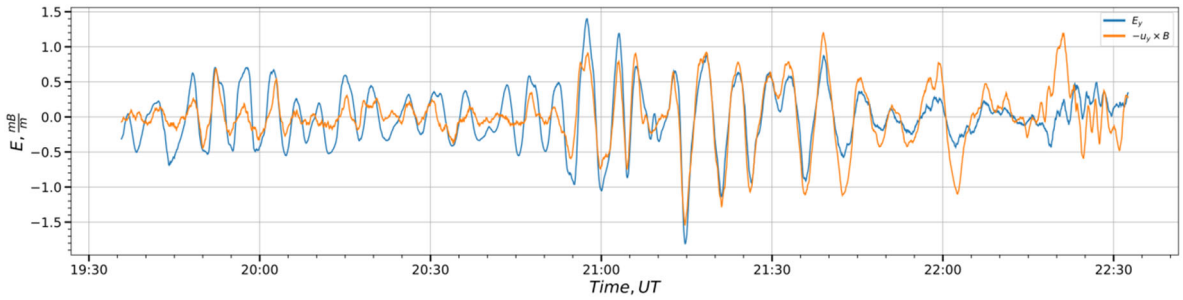

Рис. 2. Соотношение колебаний E и $-u \times B$ для временного интервала 29 марта 2017 г. с 19:35 по 22:32

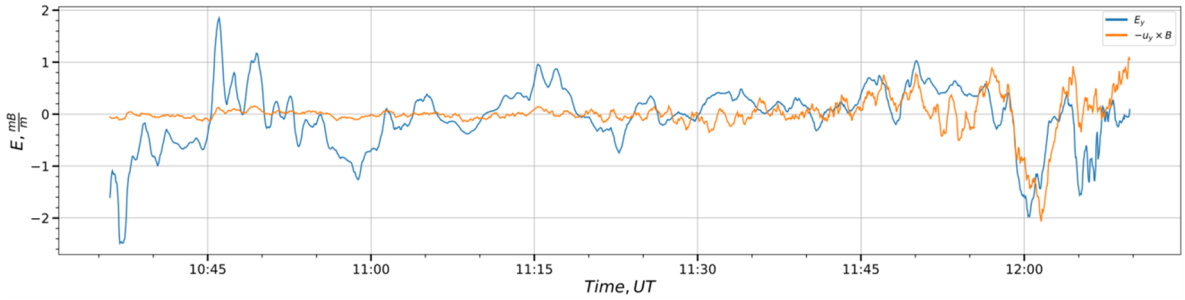

Рис. 3. Соотношение колебаний E и $-u \times B$ для временного интервала 6 марта 2017 г. с 10:36 по 12:09

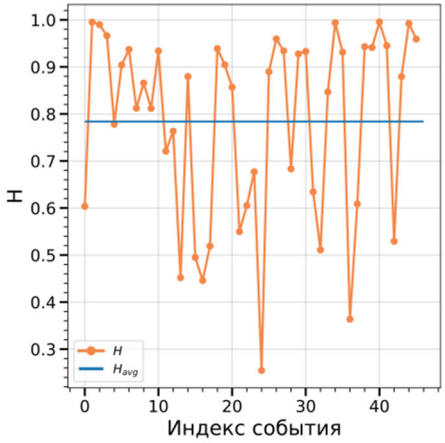

Рис. 4. Изменение среднего показателя параметра H в течении марта 2017 г. по изучаемым временным интервалам. Синей линией выделено общее среднее значение параметра H за весь месяц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенного исследования были проанализированы 46 временных интервалов продолжительностью от одного до 12 ч (рис. 4). Был введён параметр H (2), позволяющий оценить, насколько коррелируют между собой E и $-u \times B$.

Среди интервалов были обнаружены участки с небольшими значениями параметра $H_{avg} < 0.5$, для которых можно считать, что выполнимость условия вмороженности есть, хоть и не на всём исследуемом интервале. Однако противоположных случаев с $H_{avg} > 0.5$ гораздо больше, что говорит о том, что нельзя говорить об однозначном выполнении условия вмороженности. Таким образом, изучение вмороженности плазмы остаётся актуальным вопросом и требует дальнейшего изучения.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 22-77-10032.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Alfvén H. On the existence of electromagnetic–hydrodynamic waves // Arkiv för matematik, astronomi och fysik. 1943. V. 29B, N 2. P. 1–7.

Angelopoulos V. The THEMIS Mission // Space Sci Rev. 2008. V. 141. P. 5–34.

Auster H.U. et al. The THEMIS Fluxgate Magnetometer // Space Sci Rev. 2008. V. 141, N 1–4. P. 235–264.

Bonnell J.W. et al. The Electric Field Instrument (EFI) for THEMIS // Space Sci Rev. 2008. V. 141, N 1–4. P. 303–341.

Gordeev E. et al. On the origin of plasma sheet reconfiguration during the substorm growth phase // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44, N 17. P. 8696–8702.

Lui A.T.Y. Dipolarization fronts and magnetic flux transport // Geosci Lett. 2015. V. 2, N 1. P. 15.

McFadden J. P. et al. THEMIS ESA First Science Results and Performance Issues // Space Sci Rev. 2008. V. 141, N 1–4. P. 477–508.