

УДК 523.31-854+533.951.7+520.64-14

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВИХРЕВОЙ ДИФФУЗИИ В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И ЕГО ЗАВИСИМОСТЬ ОТ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ MMS

© 2024 г. Д. Ю. Найко^{1, 2, *}, И. Л. Овчинников^{1, **}, Е. Е. Антонова^{1, 3, ***}

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (НИИЯФ МГУ), Москва, Россия

² Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ), Москва, Россия

³ Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН), Москва, Россия

*e-mail: daniilnaiko@mail.ru

**e-mail: ilya@psn.ru

***e-mail: elizaveta.antonova@gmail.com

Поступила в редакцию 19.07.2023 г.

После доработки 19.10.2023 г.

Принята к публикации 23.11.2023 г.

Представлены результаты статистического анализа распределения коэффициента вихревой диффузии в зависимости от координат в плазменном слое магнитосферы Земли с использованием данных системы спутников *Magnetospheric Multiscale Mission* за период с 2017 по 2022 г. Локализация спутников внутри плазменного слоя фиксировалась по концентрации и температуре ионов плазмы по данным тех же приборов и значению плазменного параметра β . Обнаружена значительная анизотропия коэффициента вихревой диффузии. Проведен анализ зависимости коэффициента вихревой диффузии от межпланетного магнитного поля, показано, что при южной ориентации межпланетного магнитного поля значения коэффициентов вихревой диффузии в 1.5–2 раза больше, чем при северной. Также показано, что при возмущенных геомагнитных условиях ($SML < -200$ нТл) значения коэффициентов вихревой диффузии в несколько раз больше, чем при спокойных геомагнитных условиях ($SML > -50$ нТл).

DOI: 10.31857/S0016794024020032, EDN: DZKPRA

1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из характерных особенностей развития турбулентности в плазменных системах является возникновение турбулентного транспорта, приводящего к перемешиванию и выравниванию градиентов гидродинамических параметров. Магнитосфера Земли является гигантской плазменной лабораторией для изучения процессов турбулентного переноса в бесстолкновительной плазме при числах Рейнольдса превышающих для кулоновских столкновений 10^{10} [Borovsky and Funsten, 2003]. В хвосте магнитосферы Земли развиваются различные неустойчивости и устанавливается турбулентный режим течения.

Высокий уровень турбулентных флуктуаций наблюдается в хвосте магнитосферы Земли, что

было отмечено еще в ранних публикациях [Антонова, 1985; Montgomery, 1987; Angelopoulos et al., 1993; Angelopoulos et al., 1999]. Однако, основное внимание было сосредоточено на изучение пучков частиц, диполизаций магнитных силовых линий и других крупномасштабных явлений. Последовательное изучение турбулентности в хвосте магнитосферы Земли началось с работ [Borovsky et al., 1997; Borovsky et al., 1998; Borovsky and Funsten, 2003] по данным спутника ISEE-2, в которых основное внимание уделялось флуктуациям магнитного поля и скорости плазмы. Было показано, что корреляционное время для флуктуаций скорости составляет ~ 2 мин, для магнитного поля ~ 8 мин, при этом корреляционная длина (длина пути перемешивания) ~ 10000 км. По данным магнитных

наблюдений было установлено, что в плазменном слое турбулентность обладает перемежаемостью, то есть зоны с сильными флуктуациями соседствуют со спокойными зонами в пространстве и времени [Angelopoulos et al., 1999; Vörös et al., 2003; Weygand et al., 2005]. Результаты работы [Weygand et al., 2005] показали, что значение корреляционной длины варьирует в пределах от 4000 до 10000 км. Исследована связь спектров флуктуаций магнитного поля со струйными течениями BBF (*Bursty Bulk Flows*). Установлено [Angelopoulos et al., 1999; Vörös et al., 2003; Weygand et al., 2005], что в плазменном слое турбулентность обладает перемежаемостью, то есть зоны с сильными флуктуациями соседствуют со спокойными зонами в пространстве и времени. Исследования флуктуаций электрического поля в хвосте магнитосферы были сопряжены с определенными трудностями и, фактически, начались с запуска четырехспутниковой миссии *Multiscale Magnetosphere Mission* (MMS) [Burch et al., 2016; Torbert et al., 2016; Pollock et al., 2016], когда удалось получить надежные измерения трех компонент электрического поля (см. [Овчинников и др., 2023] и ссылки в этой работе).

Роль турбулентного переноса в динамику магнитосферных потоков определяется коэффициентом вихревой диффузии. Первые оценки данного коэффициента поперек плазменного слоя магнитосферы Земли были проведены в работе [Vorovsky et al., 1998] по данным спутника ISEE-2. Измерения на этом спутнике позволяли определять флуктуации скорости плазмы только в плоскости плазменного слоя (в направлении X , Y солнечно-магнитосферной (SM) системы координат). Поэтому было предположено, что уровень флуктуаций поперек слоя совпадает с уровнем флуктуаций вдоль слоя. Был вычислен коэффициент вихревой диффузии, равный $2.6 \cdot 10^5$ км²/с. Эта оценка совпала по порядку величины с предсказаниями модели магнитостатически равновесного турбулентного плазменного слоя, сжимаемого в Z -направлении полем утро-вечер [Антонова и Овчинников, 1996; Antonova and Ovchinnikov, 1998]. Результаты измерений на спутнике Интербол/Хвостовой зонд [Ермолов и др., 2000], на котором определялись флуктуации скорости в направлении (Y , Z), подтвердили оценку из работы [Vorovsky et al., 1998]. В ходе измерений на этом спутнике были определены значения коэффициента вихревой диффузии поперек слоя в магнитоспокойное время и во время суббурь [Овчинников и др., 2000, 2002; Ovchinnikov et al., 2002]. В дальнейшем, коэффициенты вихревой диффузии определялись по данным спутников Geotail, Cluster и THEMIS [Troshichev et al., 2002; Stepanova et al., 2005; Stepanova et al., 2009; Stepanova et al., 2011; Nagata et al., 2008; Wang et al., 2010; Pinto et al., 2011]. В работах [Овчинников и Антонова, 2017; Antonova and Stepanova, 2021]

приведены обзоры полученных результатов. Переменяющийся характер турбулентности плазменного слоя привел к коэффициентам вихревой диффузии, отличающимся более чем на порядок величины [Stepanova et al., 2005; Stepanova et al., 2009; Stepanova et al., 2011; Eyselade et al., 2021], что потребовало продолжения исследований в зависимости от параметров солнечного ветра и геомагнитной активности.

Реализация проекта MMS позволила определять характеристики флуктуаций параметров плазменного слоя с высокой надежностью и более высоким временным разрешением, чем это было сделано ранее. Подробно исследовались отдельные события BBF в режиме с повышенным разрешением [см., например, Ergun et al., 2018]. Статистические исследования коэффициентов вихревой диффузии с использованием данных MMS ранее не проводились. В настоящей работе проводится статистическое исследование флуктуаций скорости, вычисляются коэффициенты вихревой диффузии за период работы проекта с 2017 по 2022 г.

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Для расчета коэффициента вихревой диффузии использовались данные измерений гидродинамической скорости ионов плазмы приборами FPI/DIS спутниковой миссии MMS [Pollock et al., 2016] с временным разрешением $1/4.5$ с⁻¹. Активная флуктуация компонент гидродинамической скорости плазмы в плазменном слое хвоста магнитосферы выявлена при построении трехмерных годографов гидродинамической скорости. Пример

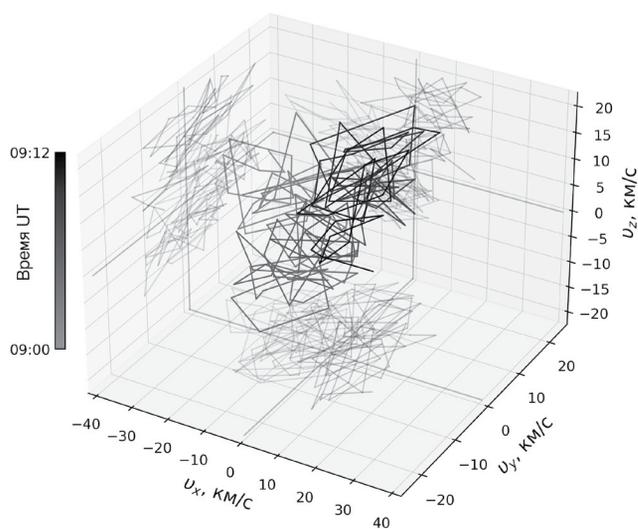


Рис. 1. Пример годографа скоростей плазмы в плоскостях XY , XZ , YZ для интервала 09:00–09:12 UT 25 мая 2017 г. по данным MMS1.

полученного годографа показан на рис. 1 для интервала 09:00—09:12 25 мая 2017 г.

Для выделения промежутков времени, когда космический аппарат находился внутри плазменного слоя, использовался критерий предложенный в работе [Stepanova et al., 2011]: координаты аппарата в системе GSM удовлетворяют условиям $X < -6 R_E$, $|Y| < |X|$, $|Z| < 8 R_E$ (где R_E — радиус Земли), концентрация ионов плазмы $n_i > 0.1 \text{ см}^{-3}$, температура ионов $T_i > 0.5 \text{ кэВ}$, плазменный параметр $\beta > 1$, где β — это отношение давления плазмы к давлению магнитного поля. Позже было показано [Antonova et al., 2013; Antonova et al., 2014], что измерения на геоцентрических расстояниях до $\sim 10\text{--}13 R_E$ соответствуют области окружающего Землю плазменного кольца, на которую проецируется большая часть аврорального овала [Antonova et al., 2014; Antonova et al., 2015]. Ниже мы убедимся в справедливости данного результата.

Все параметры усреднялись по 6-мин интервалам времени. За 2017—2022 гг. было выделено 29 тысяч 6-мин интервалов, когда в плазменном слое находился и передавал данные хотя бы один аппарат миссии MMS. Каждый из 6-мин интервалов анализировался совместно с предыдущим.

Для вычисления коэффициентов вихревой диффузии интервалы объединялись попарно, т. е. использовались 12-мин интервалы, содержащие по 160 измеренных значений гидродинамической скорости.

Оценка коэффициентов вихревой диффузии по данным о скоростях проводилась в соответствии с методикой [Vogovsky et al., 1997, 1998]. Для компонент гидродинамической скорости ионов плазмы V_α строились автокорреляционные функции

$$A_{\alpha\beta}(\tau) = \frac{\sum (V_\alpha(i) - V_\alpha)(V_\beta(i + \tau) - V_\beta)}{\sqrt{\sum (V_\alpha(i) - V_\alpha)^2} \sqrt{\sum (V_\beta(i + \tau) - V_\beta)^2}}, \quad (1)$$

где $V_{rms,\alpha\beta}^2 = (V_\alpha(i) - V_\alpha)(V_\beta(i) - V_\beta)$ — среднеквадратичная скорость, а угловыми скобками обозначено усреднение по всем измерениям выбранного интервала. Индексы $\alpha, \beta \in \{X, Y, Z\}$. Примеры получающихся автокорреляционных функций показаны на рис. 2.

Для вычисления автокорреляционного времени $\tau_{\alpha\beta}$ автокорреляционная функция методом наименьших квадратов аппроксимировалась показательной функцией $A_{\alpha\beta}(\tau) = \exp(-\tau/\tau_{\alpha\beta})$. Использование процедуры определения корреляционного времени в соответствии с подходом Vogovsky et al. [1997, 1998] может содержать значительные ошибки (см. рис. 2), что связано с перемежаемостью турбулентности. Это было учтено в ходе анализа результатов.

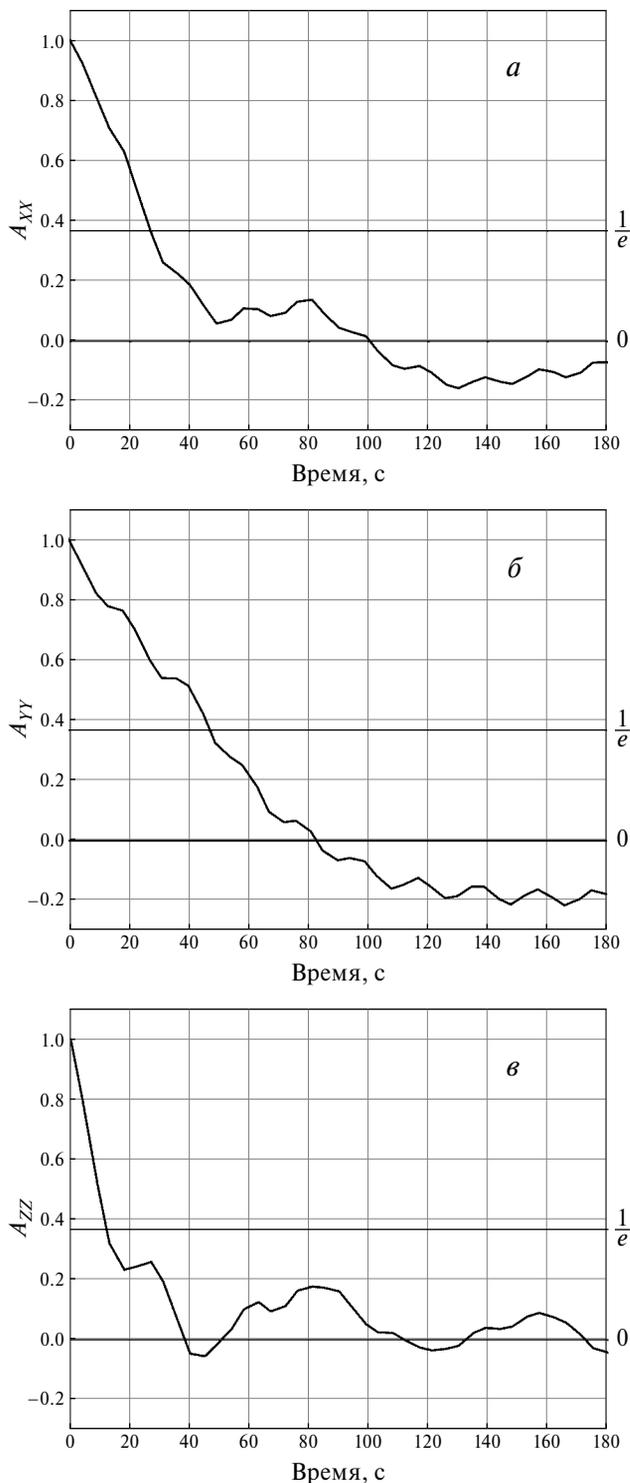


Рис. 2. Примеры автокорреляционных функций компонент скорости плазмы для интервала 0:20—0:32 UT 28.05.2017 по данным MMS1: (а) — AXX, (б) — AYY, (в) — AZZ.

Коэффициенты вихревой диффузии вычислялись в соответствии с соотношением:

$$D_{\alpha\beta} = V_{rms,\alpha\beta}^2 \tau_{\alpha\beta} / 2. \quad (2)$$

Для каждого из 12-мин интервалов были построены автокорреляционные функции (1) и вычислены автокорреляционные времена. В соответствии с формулой (2) были получены значения компонент вихревой диффузии. Для дальнейшего анализа использовались только диагональные компоненты D_{xx} , D_{yy} , D_{zz} .

Анализ зависимости коэффициентов вихревой диффузии от направления межпланетного магнитного поля был произведен с использованием значений измерений межпланетного магнитного поля в солнечном ветре в точке Лагранжа $L1$ по данным базы данных OMNI. Каждый 12-мин интервал добавлялся в выборку при условии, что на протяжении всего интервала B_z -компонента межпланетного магнитного поля (ММП) не меняла знак. Отбор значений коэффициентов вихревой диффузии для анализа их зависимости от геомагнитной активности производился с учетом значений геомагнитного индекса SuperMAG SML , вычисляемого аналогично AL -индексу, но для большего числа станций. Для каждого 12-мин интервала проверялись следующие условия: $SML > -50$ нТл для всех наблюдаемых интервалов, предшествующих рассматриваемому (и включая рассматриваемый) на протяжении часа для отбора интервалов при спокойной геомагнитной активности; $SML < -200$ нТл для отбора интервалов при высокой геомагнитной активности.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

По полученному массиву данных для двух направлений ММП были построены распределения

диагональных компонент коэффициентов вихревой диффузии в зависимости от GSM X - и Y -координат в плазменном слое магнитосферы и определены усредненные радиальные профили коэффициентов диффузии (рис. 3, 4), а также были рассчитаны средние значения диагональных компонент коэффициента вихревой диффузии.

Средние значения при северной ориентации ММП составили: $6.7 \cdot 10^4$ км²/с, $3.1 \cdot 10^4$ км²/с, $1.1 \cdot 10^4$ км²/с для D_{xx} , D_{yy} и D_{zz} соответственно; при южной ориентации ММП — $16.4 \cdot 10^4$ км²/с, $5.9 \cdot 10^4$ км²/с, $1.9 \cdot 10^4$ км²/с для D_{xx} , D_{yy} и D_{zz} соответственно. При усреднении область окружающего Землю плазменного кольца не выделялась.

Для отобранных наборов данных построены распределения диагональных компонент коэффициентов вихревой диффузии в зависимости от GSM X - и Y -координат в плазменном слое магнитосферы Земли при спокойной геомагнитной обстановке при $SML > -50$ нТл и в моменты суббурь при $SML < -200$ нТл. Построены усредненные радиальные профили коэффициентов вихревой диффузии для спокойного времени и суббурь (рис. 5, 6).

Средние значения компонент коэффициентов вихревой диффузии при спокойной геомагнитной обстановке составили: $5.9 \cdot 10^4$ км²/с, $2.7 \cdot 10^4$ км²/с, $0.9 \cdot 10^4$ км²/с для D_{xx} , D_{yy} и D_{zz} соответственно; при суббурях значения составили $19.5 \cdot 10^4$ км²/с, $7.6 \cdot 10^4$ км²/с, $2.5 \cdot 10^4$ км²/с для D_{xx} , D_{yy} и D_{zz} соответственно.

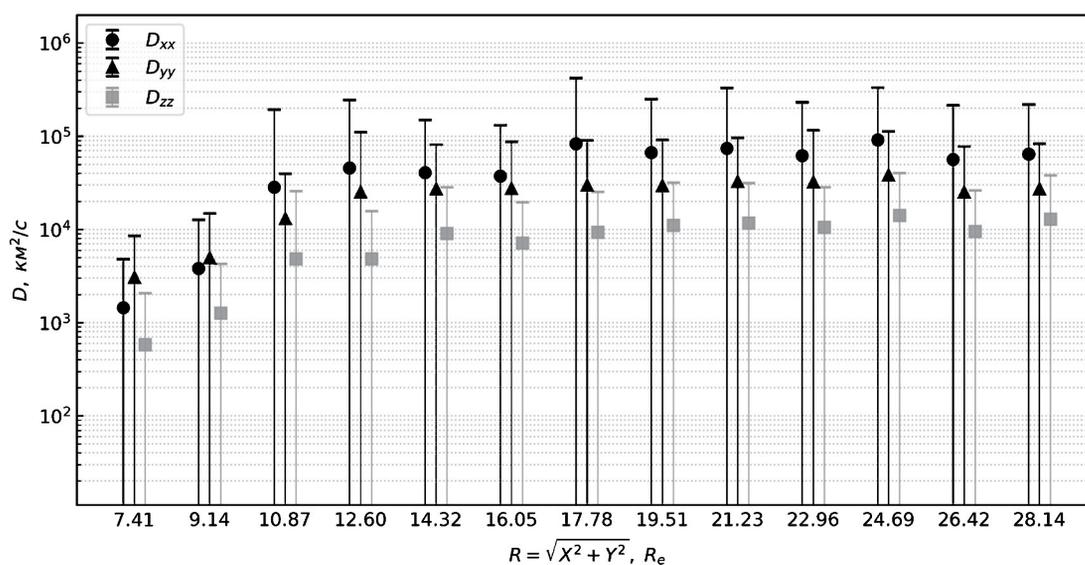


Рис. 3. Усредненные радиальные профили коэффициентов вихревой диффузии при северном направлении межпланетного магнитного поля.

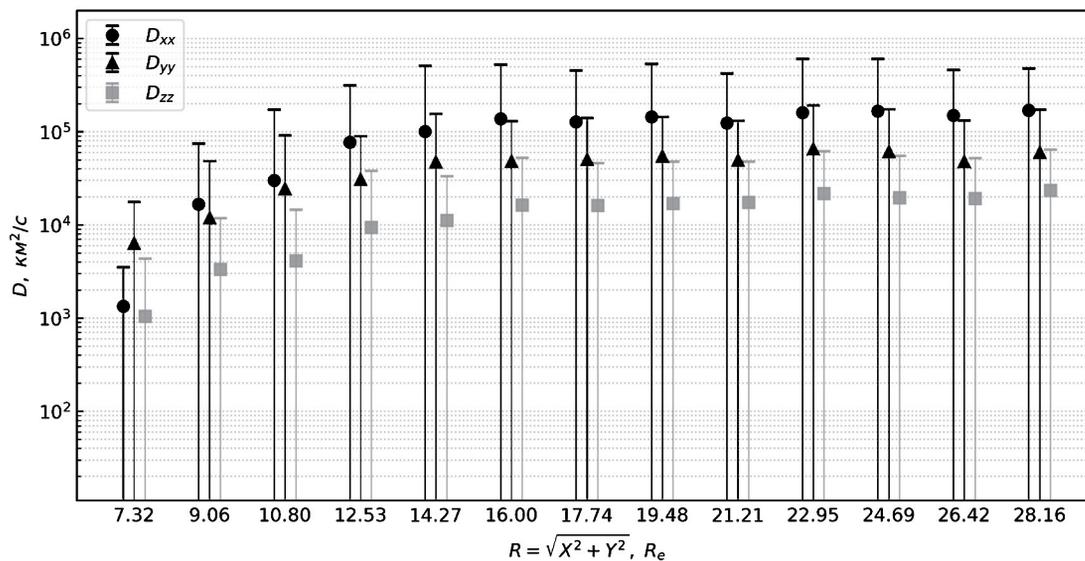


Рис. 4. Усредненные радиальные профили коэффициентов вихревой диффузии при южном направлении межпланетного магнитного поля.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

Произведенный статистический анализ подтвердил постоянное существование высокого уровня флуктуаций скорости плазмы в хвосте магнитосферы Земли, рассчитываемой в проекте MMS по стандартной методике определения гидродинамических параметров плазмы. Необходимо отметить, что использованная методика определения автокорреляционного времени является не единственно возможной [Borovsky et al., 1997] и может

приводить к занижению вычисленных значений коэффициентов вихревой диффузии.

В целом, как и ожидалось, значения коэффициентов вихревой диффузии зависят как от направления межпланетного магнитного поля, так и от геомагнитной активности в силу известной статистической зависимости геомагнитной активности от компонент ММП.

Результаты статистического анализа данных MMS в целом подтверждают полученные ранее закономерности и позволяют выявить новые

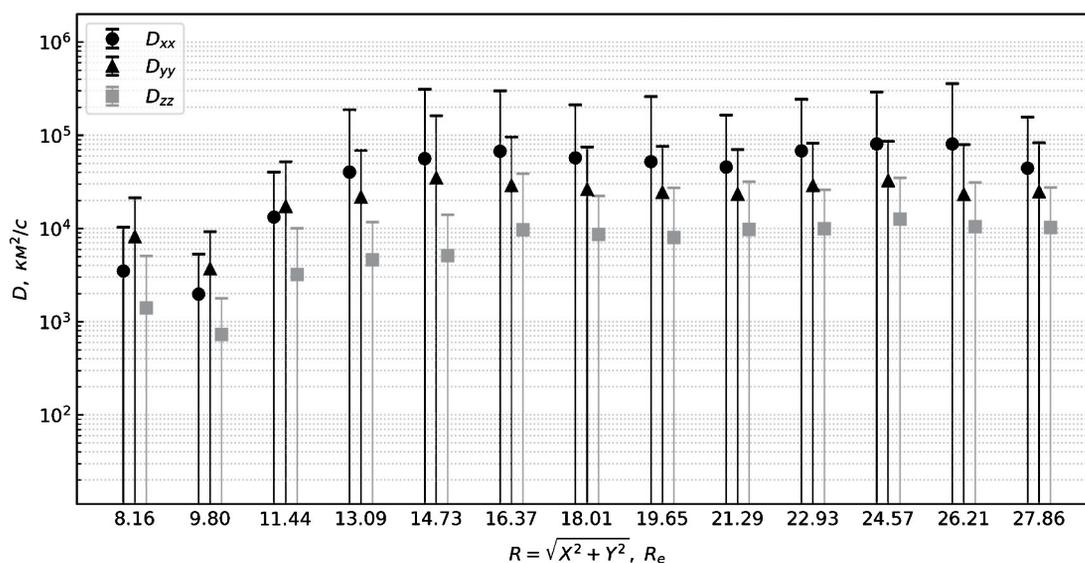


Рис. 5. Усредненные радиальные профили коэффициентов вихревой диффузии в спокойной геомагнитной обстановке ($SML > -50$ нТл).

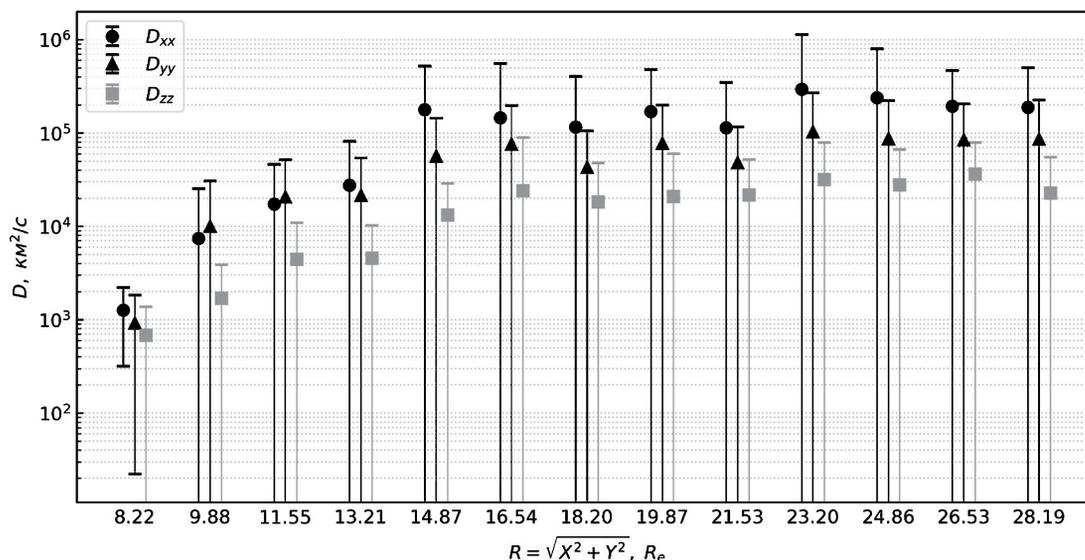


Рис. 6. Усредненные радиальные профили коэффициентов вихревой диффузии в возмущенной геомагнитной обстановке ($SML < -200$ нТл).

особенности. Рисунки 3, 4 показывают, что при южной ориентации межпланетного магнитного поля средние значения коэффициентов вихревой диффузии в 1.5–2 раза больше, чем при северной. В среднем, коэффициент вихревой диффузии в X -направлении превышает значение коэффициента вихревой диффузии в Y -направлении. Минимальны значения коэффициента вихревой диффузии поперек плазменного слоя. В целом усредненные $D_{xx} > D_{yy} > D_{zz}$. Следует отметить, что такая закономерность может не соблюдаться в отдельных событиях.

Зависимости $D_{xx} > D_{yy} > D_{zz}$ сохраняется для периодов магнитосферных суббурь (см. рис. 6). Во время магнитосферных суббурь значения коэффициентов вихревой диффузии в несколько раз больше, чем в спокойное время.

Для радиальных профилей компонент вихревой диффузии (см. рис. 3–6) характерно увеличение значений коэффициентов с ростом геоцентрического расстояния до $\sim 14R_E$ с последующим выходом на плато. Данная закономерность подтверждает выводы работ о проецировании аврорального овала на внешнюю часть кольцевого тока, а не на собственно плазменный слой, где постоянно высок уровень турбулентности. Как известно, на широтах аврорального овала в магнитоспокойных условиях могут наблюдаться почти стационарные вихри, приводящие к формированию авроральных структур типа перевернутого V [Antonova and Ovchinnikov, 1998] и стабильные авроральные дуги. В целом закономерность близка к результатам [Stepanova et

al., 2009, 2011; Pinto et al., 2011], но получена на большей статистике.

5. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ с использованием данных миссии MMS подтвердил наличие больших флуктуации скоростей плазмы в плазменном слое.

Создана база данных, позволившая получить первые результаты по зависимости коэффициентов вихревой диффузии в (X , Y , Z) направлениях от направления ММП и уровня геомагнитной активности.

Проанализированы флуктуации скорости плазмы на 12-мин интервалах в ночном секторе при $X < -6 R_E$, $|Y| < X$, $|Z| < 8 R_E$ в области, где плазменный параметр превышает единицу, включающую часть окружающего Землю плазменного кольца и собственно плазменный слой. Получены значения диагональных компонент тензора вихревой диффузии и их усредненные значения.

Исследованы зависимости компонент тензора вихревой диффузии от направления ММП. Показано, что при южной ориентации межпланетного магнитного поля значения коэффициентов вихревой диффузии в 1.5–2 раза больше, чем при северной.

Определены усредненные зависимости от уровня геомагнитной активности в спокойных условиях при $SML > -50$ нТл и в возмущенных при $SML < -250$ нТл условиях. Установлено, что в моменты магнитных суббурь значения коэффициентов вихревой диффузии в несколько раз

превосходят значения при спокойной геомагнитной активности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны коллективу проекта MMS за возможность использования данных, а также создателям базы данных OMNI (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>) и проекта SuperMAG (<https://supermag.jhuapl.edu/info/>).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00076, (<https://rscf.ru/project/23-22-00076/>).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антонова Е.Е.* О неадиабатической диффузии, выравнивании концентрации и температуры в плазменном слое магнитосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1985. Т. 25. № 4. С. 623—627.
- Антонова Е.Е., Воробьев В.Г., Кирпичев И.П., Ягодкина О.И.* Сравнение распределения давления плазмы в экваториальной плоскости и на малых высотах в магнитоспокойных условиях // Геомагнетизм и аэрономия. 2014. Т. 54. № 3. С. 300—303. <https://doi.org/10.7868/S001679401403002X>
- Антонова Е.Е., Овчинников И.Л.* Равновесие турбулентного токового слоя и токовый слой хвоста магнитосферы Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. 36. № 5. С. 7—14.
- Ермолаев Ю.И., Петрукович А.А., Зеленый Л.М., Антонова Е.Е., Овчинников И.Л., Сергеев В.А.* Исследования структуры и динамики плазменного слоя в эксперименте Коралл проекта Интербол // Космич. исслед. 2000. Т. 38. № 1. С. 16—22.
- Овчинников И.Л., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И.* Определение коэффициента турбулентной диффузии в плазменном слое по данным проекта ИНТЕРБОЛ // Космич. исслед. 2000. Т. 38. № 6. С. 596—601.
- Овчинников И.Л., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И.* Турбулентность в плазменном слое во время суббурь (Исследование ряда случаев на базе наблюдений хвостового зонда проекта ИНТЕРБОЛ) // Космич. исслед. 2002. Т. 40. № 6. С. 563—570.
- Овчинников И.Л., Антонова Е.Е., Найко Д.Ю.* Флуктуации электрического и магнитного полей в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли по данным MMS // Космич. исслед. 2024. Т. 62. № 1. Принято к печати.
- Angelopoulos V., Kennel C.F., Coroniti F.V., Pellat R., Spence H.E., Kivelson M.G., Walker R.J., Baumjohann W., Feldman W.C., Gosling J.T.* Characteristics of ion flow in the quiet state of the inner plasma sheet // Geophys. Res. Lett. 1993. V. 20. № 16. P. 1711—1714. <https://doi.org/10.1029/93GL00847>
- Angelopoulos V., Mukai T., Kokubun S.* Evidence for intermittency in Earth's plasma sheet and implications for selforganized criticality // Phys. Plasmas. 1999. V. 6. № 11. P. 4161—4168. <https://doi.org/10.1063/1.873681>
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Stepanova M.V.* Plasma pressure distribution in the surrounding the Earth plasma ring and its role in the magnetospheric dynamics // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2014. V. 115. № 8. P. 32—40. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.12.005>
- Antonova E.E., Kirpichev I.P., Vovchenko V.V., Stepanova M.V., Riazantseva M.O., Pulinetz M.S., Ovchinnikov I.L., Znatkova S.S.* Characteristics of plasma ring, surrounding the Earth at geocentric distances ~7—10 RE, and magnetospheric current systems // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 99. № 7. P. 85—91. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.08.013>
- Antonova E.E., Ovchinnikov I.L.* Magnetostatically equilibrated plasma sheet with developed medium-scale turbulence: structure and implications for substorm dynamics // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. P. 17289—17297. <https://doi.org/10.1029/1999JA900141>
- Antonova E.E., Stepanova M.V.* The impact of turbulence on physics of the geomagnetic tail // Front. Astron. Space Sci. V. 8: 622570. 2001. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.622570>
- Antonova E.E., Vorobjev V.G., Kirpichev I.P., Yagodkina O.I., Stepanova M.V.* Problems with mapping the auroral oval and magnetospheric substorms // Earth Planets and Space. 2015. V. 67. <https://doi.org/10.1186/s40623-015-0336-6>
- Borovsky J.E., Elphic R.C., Funsten H.O., Thomsen M.F.* The Earth's plasma sheet as a laboratory for turbulence in high- β MHD // J. Plasma Phys. 1997. V. 57. № 1. P. 1—34. <https://doi.org/10.1017/S0022377896005259>
- Borovsky J.E., Funsten H.E.* MHD turbulence in the Earth's plasma sheet: Dynamics, dissipation and driving // J. Geophys. Res. 2003. V. 107. № A7. <https://doi.org/10.1029/2002JA009625>
- Borovsky J.E., Thomsen M.F., Elphic R.C.* The driving of the plasma sheet by the solar wind // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № A8. P. 17617—17639. <https://doi.org/10.1029/97JA02986>
- 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—21. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0164-9>
- Ergun R.E., Goodrich K.A., Wilder F.D., et al.* Magnetic reconnection, turbulence, and particle acceleration: Observations in the Earth's magnetotail // Geophys. Res. Lett. 2018. V. 45. P. 3338—3347. <https://doi.org/10.1002/2018GL076993>

- Eyelade A.V., Espinoza C.M., Stepanova M., Antonova E.E., Ovchinnikov I.L., Kirpichev I.P.* Influence of MHD turbulence on ion kappa distributions in the Earth's plasma sheet as a function of plasma β parameter // *Front. Astron. Space Sci.* V. 8: 647121. 2021.
<https://doi.org/10.3389/fspas.2021.647121>
- Montgomery D.* Remarks on the MHD problem of generic magnetospheres and magnetotails. *Magnetotail Physics*. Ed. A.T.Y. Lui. 1987. P. 203—204. Baltimore, Md.: Johns Hopkins University Press, 1987.
- Nagata D., Machida S., Ohtani S., Saito Y., Mukai T.* Solar wind control of plasma number density in the nearEarth plasma sheet: three-dimensional structure // *Ann. Geophysicae*. 2008. V. 26. № 12. P. 4031—4049.
<https://doi.org/10.5194/angeo-26-4031-2008>
- Ovchinnikov I.L., Antonova E.E., Yermolaev Yu.I.* Plasma sheet heating during substorm and the values of the plasma sheet diffusion coefficient obtained on the base of Interball/Tail probe observations // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30. № 7. P. 1821—1824.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)00456-8](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)00456-8)
- Pinto V., Stepanova M., Antonova E.E., Valdivia J.A.* Estimation of the eddy-diffusion coefficients in the plasma sheet using THEMIS satellite data // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. № 7. P. 1472—1477.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.05.007>
- Pollock C., Moore T., Jacques A., et al.* Fast Plasma Investigation for Magnetospheric Multiscale // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. P. 331—406.
<https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4>
- Stepanova M., Antonova E.E., Paredes-Davis D., Ovchinnikov I.L., Yermolaev Y.I.* Spatial variation of eddy-diffusion coefficients in the turbulent plasma sheet during substorms // *Ann. Geophysicae*. 2009. V. 27. № 4. P. 1407—1411.
<https://doi.org/10.5194/angeo-27-1407-2009>
- Stepanova M., Antonova E.E.* Modeling of the turbulent plasma sheet during quiet geomagnetic conditions // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. V. 73. № 8. P. 1636—1642.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.02.009>
- Stepanova M., Pinto V., Valdivia J.A., Antonova E.E.* Spatial distribution of the eddy diffusion coefficients in the plasma sheet during quiet time and substorms from THEMIS satellite data // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116. № 1.
<https://doi.org/10.1029/2010JA015887>
- Stepanova M.V., Vucina-Parga T., Antonova E.E., Ovchinnikov I.L., Yermolaev Yu.I.* Variation of the plasma turbulence in the central plasma sheet during substorm phases observed by the Interball/tail satellite // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2005. V. 67. № 11. P. 1815—1820.
<https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.013>
- Torbert R.B., Russell C.T., Magnes W., et al.* The FIELDS Instrument Suite on MMS: Scientific Objectives, Measurements, and Data Products // *Space Sci. Rev.* 2016. V. 199. P. 105—135.
<https://doi.org/10.1007/s11214-014-0109-8>
- Troshichev O.A., Antonova E.E., Kamide Y.* Inconsistence of magnetic field and plasma velocity variations in the distant plasma sheet: violation of the “frozen-in” criterion? // *Adv. Space Res.* 2002. V. 30. № 12. P. 2683—2687.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(02\)80382-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)80382-9)
- Vörös W., Baumjohann W., Nakamura R., Runov A., et al.* Multi-scale magnetic field intermittence in the plasma sheet // *Ann. Geophysicae*. 2003. V. 21. № 9. P. 1955—1964.
<https://doi.org/10.5194/angeo-21-1955-2003>
- Wang C.-P., Lyons L.R., Nagai T., Weygand J.M., Lui A.T.Y.* Evolution of plasma sheet particle content under different interplanetary magnetic field conditions // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115. № 6.
<https://doi.org/10.1029/2009JA015028>
- Weygand J.M., Kivelson M.G., Khurana K.K., Schwarzl H.K., et al.* Plasma sheet turbulence observed by Cluster II // *J. Geophys. Res.* 2005. V. 110. № 2.
<https://doi.org/10.1029/2004JA010581>

Spatial Distribution of the Eddy Diffusion Coefficient in the Plasma Sheet of Earth's Magnetotail and its Dependence on the Interplanetary Magnetic Field and Geomagnetic Activity based on MMS Satellite Data

D. Yu. Naiko^{1, 2, *}, I. L. Ovchinnikov^{1, **}, E. E. Antonova^{1, 3, *}**

¹ *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

² *Department of Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

³ *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

**e-mail: daniilnaiko@mail.ru*

***e-mail: ilya@psn.ru*

****e-mail: elizaveta.antonova@gmail.com*

The article presents the results of a statistical analysis of the distribution of the eddy diffusion coefficient depending on the coordinates in the plasma sheet of Earth's magnetosphere based on data from the Magnetospheric Multiscale Mission satellite system (MMS) for the period from 2017 to 2022. The localization of satellites inside the plasma sheet was recorded from the concentration and temperature of plasma ions according to the data of the same instruments and the value of plasma parameter β . Significant anisotropy of the eddy diffusion coefficient was revealed. The dependence of the eddy diffusion coefficient on the inter-planetary magnetic field is analyzed, showing that with the southern orientation of the interplanetary magnetic field, the eddy diffusion coefficients are 1.5–2 times greater than with the northern orientation. It is also shown that under disturbed geomagnetic conditions ($SML < -200$ nT), the eddy diffusion coefficients are several times greater than under quiet geomagnetic conditions ($SML > -50$ nT).