

ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ВИХРЕВОЙ ДИФФУЗИИ ОТ ПЛАЗМЕННОГО ПАРАМЕТРА β В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

DEPENDENCE OF EDDY DIFFUSION COEFFICIENT ON PLASMA PARAMETER β IN EARTH'S MAGNETOTAIL

Д.Ю. Найко

Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, daniilnaiko@mail.ru

И.Л. Овчинников

Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, ilya@psn.ru

Е.Е. Антонова

Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д.В. Скобельцына Московского государственного
университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия, elizaveta.antonova@gmail.com
Институт космических исследований РАН,
Москва, Россия

D.Yu. Naiko

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, daniilnaiko@mail.ru

I.L. Ovchinnikov

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, ilya@psn.ru

E.E. Antonova

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia, elizaveta.antonova@gmail.com
Space Research Institute RAS,
Moscow, Russia

Аннотация. В работе проведен анализ зависимостей коэффициентов вихревой диффузии в направлениях X, Y и Z системы координат GSM от плазменного параметра β с учетом расстояния от Земли, направления межпланетного магнитного поля и условий геомагнитной активности в хвосте магнитосферы по данным Magnetospheric Multiscale Mission (MMS). Данные параметры определяются величинами среднеквадратичных скоростей ионов и их автокорреляционными временами. Коэффициенты вихревой диффузии характеризуют величину турбулентного транспорта в хвосте магнитосферы и являются параметрами модели турбулентного плазменного слоя. Анализировалось более 20000 12-минутных интервалов, во время которых спутники MMS находились внутри области с плотностью плазмы более 0.1 см^{-3} и средней энергией ионов более 0.5 кэВ. Показано, что с возрастанием плазменного параметра растут и коэффициенты вихревой диффузии. Данный рост прекращается при $\beta \sim 1$. Анализ относительного вклада изменений среднеквадратичной скорости и автокорреляционного времени в коэффициент вихревой диффузии показал отсутствие существенной зависимости от автокорреляционного времени.

Ключевые слова: магнитосферная турбулентность, диффузионный транспорт, коэффициенты вихревой диффузии.

Abstract. The work analyzes dependences of eddy diffusion coefficients in the X, Y, and Z directions of the GSM coordinate system on the plasma parameter β , taking into account the distance from Earth, the direction of the interplanetary magnetic field, and conditions of geomagnetic activity in the magnetotail according to MMS mission data. These parameters are determined by root-mean-square velocities of ions and their autocorrelation time. Eddy diffusion coefficients characterize the magnitude of turbulent transport in the magnetotail and are the parameters of the model of turbulent plasma sheet. We have analyzed more than 20000 12-min intervals during which the MMS satellites were located within a region with plasma density more than 0.1 cm^{-3} and average ion energy more than 0.5 keV. It is shown that as the plasma parameter increases, the eddy diffusion coefficients increase as well. This increase stops at $\beta \sim 1$. Analysis of the relative contribution of changes in root-mean-square velocity and autocorrelation time to the eddy diffusion coefficient has revealed that there is no significant dependence on autocorrelation time.

Keywords: magnetospheric turbulence, turbulent transport, coefficients of eddy diffusion.

ВВЕДЕНИЕ

Турбулентные флуктуации наблюдаются почти во всех плазменных системах, особенно при малом уровне диссипации; они характерны для лабораторных

плазменных установок [Budaev et al., 2015]. Среди космофизических плазменных систем сравнительно давно исследуется турбулентность солнечного ветра [Bruno, Carbone, 2013; Alexandrova et al., 2013; Podesta, Borovsky, 2010; Tu, Marsch, 1995; Riazantseva

et al., 2017; Borovsky, 2020]. Позже появились публикации по турбулентности магнитослоя [Yordanova et al., 2008; Rakhmanova et al., 2018, 2020; Рахманова и др., 2024], которую было проще исследовать по сравнению с турбулентностью солнечного ветра в результате значительного возрастания уровня флуктуаций околосолнечной ударной волны. Такие исследования особенно активизировались после запуска Magnetospheric Multiscale Mission (MMS) [Sahraoui et al., 2020]. Однако влияние турбулентности солнечного ветра на турбулентность магнитослоя и влияние последней на характеристики магнитосферы почти не исследованы.

Магнитосфера Земли на высотах более 1000 км может рассматриваться в качестве бесстолкновительной плазменной системы, в которой длины свободного пробега частиц относительно кулоновских столкновений превышают расстояние от Земли до Солнца, а числа Рейнольдса превышают 10^{10} [Borovsky, Funsten, 2003]. В такой системе могут развиваться различные плазменные неустойчивости и образуются турбулентные течения. Изучение этих процессов необходимо для предсказаний космической погоды. Основной особенностью турбулентности плазменного слоя магнитосферы Земли является турбулентный транспорт. Он приводит к перемешиванию и выравниванию градиентов концентрации, давления и температуры (см. обзоры [Овчинников, Антонова, 2017; Antonova, Stepanova, 2021]).

Значительные турбулентные флуктуации были замечены еще при первых космических экспериментах. На их роль в динамике магнитосферы обращалось внимание в работах [Антонова, 1985; Montgomery, 1987; Angelopoulos et al., 1993, 1999]. При этом основной темой изучения являлись крупномасштабные явления, такие как диполизация магнитных силовых линий. Начиная с работ [Borovsky et al., 1997, 1998; Borovsky, Funsten, 2003], опирающихся на данные спутника ISEE-2, зародилось планомерное изучение турбулентности хвоста магнитосферы Земли. Практически одновременно были созданы первоначальные версии модели турбулентного хвоста [Антонова, Овчинников, 1996; Antonova, Ovchinnikov, 1996, 1999], позволившие оценить величину коэффициента турбулентной диффузии ($\sim 10^5$ км²/с), которая соответствовала бы одновременным наблюдениям толщины плазменного слоя и скорости дрейфа плазмы к экваториальной плоскости хвоста под действием крупномасштабного электрического поля утро–вечер. Считалось, что поле утро–вечер, генерируемое в результате замыкания в ионосфере крупномасштабных продольных токов Ииджимы и Потемры [Iijima, Rottemb, 1976], проецируется на геомагнитный хвост и вызывает сгребание плазмы из долей хвоста к центру плазменного слоя. В [Borovsky et al., 1998] при обосновании транспорта плазмы из солнечного ветра внутрь магнитосферы был введен коэффициент вихревой диффузии поперек плазменного слоя, т. е. в направлении Z геоцентрической солнечно-магнитосферной системы координат GSM (прямоугольная система координат с началом в центре Земли, в которой ось X направлена на Солнце, ось геомагнитного диполя расположена в плоскости XZ). Измере-

ния флуктуаций на ISEE-2 в направлении Z не проводились и предполагалось, что флуктуации квазизотропны, т. е. их величины в направлениях X, Y, Z близки. Предполагалось также, что диффузия является марковским процессом, т. е. за автокорреляционное время τ_{auto} величина каждого смещения не зависит от величины предыдущего. Для смещений по Z, $\Delta z = v_z \tau_{\text{auto}}$, где v_z — гидродинамическая скорость движения плазмы по Z. Коэффициент диффузии в таком случае

$$D_{zz} = \frac{\langle (\Delta z)^2 \rangle}{2\tau_{\text{auto}}} = \frac{v_{z\text{rms}}^2 \tau_{\text{auto}}}{2}, \quad (1)$$

где $v_{z\text{rms}}$ — среднеквадратичная скорость; $v_{z\text{rms}}$ и τ_{auto} являются лагранжевыми переменными, т. е. должны быть получены по измерениям прибора, движущегося со скоростью конвекции. Но в случае, когда регулярная скорость мала по сравнению с величинами флуктуаций, могут быть использованы эйлеровы измерения скорости, когда измеряется скорость движения плазмы относительно неподвижного прибора. Аналогично записываются диагональные компоненты тензора вихревой диффузии в направлениях X, Y. Было учтено, что большие скорости движения плазмы наблюдаются только в направлении X, при этом использовались $v_{y\text{rms}}$, измеряемые на ISEE-2. Было получено значение коэффициента вихревой диффузии $D_{zz} = 2.6 \cdot 10^5$ км²/с. Предсказанные моделью [Антонова, Овчинников, 1996; Antonova, Ovchinnikov, 1996, 1999] коэффициенты вихревой диффузии в направлении Z системы координат GSM по порядку величины совпали со значением, полученным на ISEE-2 [Borovsky et al., 1998], что могло свидетельствовать в пользу справедливости модели. Размеры вихрей при этом оказываются соизмеримыми с толщиной плазменного слоя.

Коэффициенты вихревой диффузии по данным спутника «Интерболл/Хвостовой зонд» могли быть получены по прямым измерениям v_z и подтвердили оценки модели [Ермолаев и др., 2000; Овчинников и др., 2000, 2002; Ovchinnikov et al., 2002]. Вычисления флуктуаций скоростей на спутнике GEOTAIL [Troshichev et al., 2002; Nagata et al., 2008] также позволили получить большие коэффициенты вихревой диффузии. Соответствующий анализ был позже проведен на спутниках миссий CLUSTER и THEMIS [Stepanova et al., 2005, 2009, 2011; Stepanova, Antonova, 2011; Nagata et al., 2008; Wang et al., 2010; Pinto et al., 2011] (обзоры работ в данном направлении см. в [Овчинников, Антонова, 2017; Antonova, Stepanova, 2021]).

В работе [Borovsky et al., 1997] было показано, что флуктуации скоростей плазменного слоя обладают корреляционными временами ~ 2 мин, флуктуации магнитного поля — ~ 8 мин. При этом длина пути перемешивания (корреляционная длина) составляет от 4000 до 10000 км согласно результатам работы [Weygand et al., 2005]. Было показано также, что в плазменном слое зоны сильных флуктуаций регистрируются вперемежку с зонами слабых возмущений в пространстве и времени. Это говорит о перемежаемости турбулентности плазменного слоя

[Angelopoulos et al., 1999; Vörös et al., 2003, 2004, 2006, 2007; Volwerk et al., 2004; Weygand et al., 2005]. В работах [Stepanova et al., 2005, 2009, 2011; Eyelade et al., 2021] было показано, что из-за перемежающегося характера турбулентности в плазменном слое коэффициент турбулентной диффузии принимает значения, отличающиеся более чем на порядок, что требует дальнейшего анализа. Кроме того, не было проведено подробных исследований зависимостей среднеквадратичных флуктуаций скорости, их автокорреляционных времен и коэффициентов вихревой диффузии от характеристик солнечного ветра, геомагнитной активности и локализации внутри плазменного слоя, что важно для определения природы наблюдаемой турбулентности.

Необходимо отметить, что, несмотря на большое число проанализированных наблюдений, проблемы турбулентности плазменного слоя пока не решены или остаются слабо изученными. Прежде всего, это было связано с отсутствием надежных измерений трех компонент электрического поля.

Активное изучение флуктуаций электрического поля в хвосте магнитосферы Земли началось с запуска многоспутниковой миссии NASA MMS, состоящей из четырех одинаковых спутников, образующих форму тетраэдра и находящихся на расстояниях десятков километров друг от друга [Burch et al., 2016; Torbert et al., 2016; Pollock et al., 2016], после получения точных измерений всех компонент электрического поля. К основным задачам проекта относилось изучение процессов на электронных масштабах. Поэтому большинство работ по MMS рассматривали одиночные короткие интервалы при измерениях с исключительно высоким разрешением до 8000 с^{-1} , что не позволяло проводить статистические исследования. Недавно такие исследования с временным разрешением по электрическому полю 32 с^{-1} , магнитному полю 16 с^{-1} и потокам частиц 4.5 с были выполнены в [Ovchinnikov et al., 2024; Найко и др., 2024]. Был получен ряд важных выводов о характеристиках спектров электрического и магнитного поля, подтверждены и расширены данные о коэффициентах вихревой диффузии. Тем не менее, проведенные исследования имели предварительный характер и на ряд актуальных вопросов не было получено ответов. К таким вопросам относятся величины вкладов среднеквадратичных значений флуктуаций скорости ионов и их автокорреляционных периодов, а также зависимости коэффициентов вихревой диффузии от плазменного параметра $\beta = 2\mu_0 p / B^2$, где p — давление плазмы; B — магнитное поле; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

Настоящая работа является продолжением работ [Ovchinnikov et al., 2024; Найко и др., 2024] по исследованию турбулентности в хвосте магнитосферы Земли по данным MMS, получению статистически усредненных коэффициентов вихревой диффузии и определению их зависимостей от усредненных флуктуаций скоростей и автокорреляционных времен. Второй раздел работы кратко описывает методику исследования, третий посвящен анализу полученных результатов, четвертый — обсуждению и выводам.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА АНАЛИЗА

Расчет компонент коэффициента вихревой диффузии был проведен на основе анализа данных измерений гидродинамической скорости ионов плазмы с помощью приборов FPI/DIS системы MMS [Pollock et al., 2016]. Временное разрешение данных приборов составляет $1/4.5 \text{ с}^{-1}$. За 4.5 с измерялись спектры частиц и вычислялись значения гидродинамических параметров. Подробное описание отбора проанализированных данных дано в [Ovchinnikov et al., 2024; Найко и др., 2024].

Определение компонент вихревой диффузии требовало выделения периодов со средними скоростями $|V_x| < 100 \text{ км/с}$, что позволяло проводить отсев интервалов с возможными событиями типа BBF (bursty bulk flows). Такое ограничение позволяло получать надежные значения диффузионных коэффициентов согласно ограничениям, обоснованным в [Vorovsky et al., 1998]. При этом необходимо помнить, что неучитываемые периоды BBF могут вносить существенный вклад в турбулентный транспорт в магнитоактивные периоды.

При отборе пригодных для запланированного анализа данных для каждого из спутников проводилось выделение из всего массива данных MMS 6-минутных интервалов, когда спутник находился внутри плазменного слоя или внутри переходной области от плазменного слоя к долям хвоста магнитосферы. Полная база данных [Ovchinnikov et al., 2024; Найко и др., 2024] включала измерения, когда координаты спутников в системе GSM удовлетворяли условиям $x < -6R_E$, $|y| < |x|$, $|z| < 8R_E$, где R_E — радиус Земли. Анализировались данные с 5 мая 2017 г. по 1 сентября 2023 г.

В настоящем исследовании выделялись области на геоцентрических расстояниях $15R_E < R < 30R_E$, в которых температура ионов $T_i > 0.5 \text{ кэВ}$. Считалось, что, если концентрация ионов плазмы $n_i > 0.05 \text{ см}^{-3}$, спутники находятся в плазменном слое, включая его центральную и пограничную области. Если $n_i > 0.1 \text{ см}^{-3}$ измерения проводятся в центральной области плазменного слоя. Для отделения области центрального плазменного слоя вычислялось также значение плазменного параметра для каждого временного интервала. При $0.1 < \beta < 1$ измерения были проведены в пограничной области, при $\beta > 1$ — вблизи центра плазменного слоя. В целом, выбранные критерии соответствовали критериям, использованным в [Stepanova et al., 2011], что позволило в дальнейшем сравнивать полученные значения коэффициентов вихревой диффузии.

Для каждого из 6-минутных интервалов проводилось усреднение параметров, после было проведено попарное объединение интервалов до 12-минутных, т. е. при статистическом исследовании каждый из исходных 6-минутных интервалов рассматривался совместно с предыдущим. Каждый 12-минутный интервал содержит 160 измерений гидродинамической скорости плазмы. Проект MMS был в целом ориентирован на проведение измерений вблизи экваториальной плоскости. Поэтому в итоге было рассмотрено 14206 12-минутных интервалов в центральной об-

ласти плазменного слоя и 6407 интервалов в пограничной области, что позволило набрать необходимую статистику. Для каждого отобранного интервала в направлениях вдоль слоя, по Y и поперек слоя была определена среднеквадратичная скорость $v_{rms} = \langle v_i \rangle$ и вычислено автокорреляционное время τ с помощью построения и анализа автокорреляционной функции

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

где $\alpha, \beta \in \{X, Y, Z\}$. Автокорреляционная функция аппроксимировалась показательной функцией $A_{\alpha\beta}(\tau) = \exp(-\tau/\tau_{\alpha\beta})$, и методом наименьших квадратов вычислялось значение автокорреляционного времени $\tau_{\alpha\beta}$. Вычисление диагональных компонент тензора коэффициента вихревой диффузии D_{xx}, D_{yy}, D_{zz} проводилось в соответствии с (1), т. е.

$$D_{xx, yy, zz} = \frac{v_{x, y, zrms}^2 \tau_{xx, yy, zz auto}}{2}. \quad (3)$$

Анализ зависимости коэффициентов вихревой диффузии от направления межпланетного магнитного поля (ММП) был проведен так же, как в [Найко и др., 2024], с использованием значений измерений компоненты ММП B_z в солнечном ветре по базе данных OMNI. Каждый 12-минутный интервал добавлялся в выборку при условии, что на протяжении всего интервала минимальное наблюдаемое значение $B_z > 0$ в случае северного направления ММП и максимальное — $B_z < 0$ для южного направления ММП отмечались за час до исследуемого интервала. Отбор значений коэффициентов вихревой диффузии для анализа их зависимости от геомагнитной активности проводился с учетом значений геомагнитного индекса SuperMAG SML . Он аналогичен AL -индексу, но рассчитывается по данным 110 станций вместо 12 и доступен в числовом виде до конца 2023 г.; полное его описание приведено в [Newell, Gjerloev, 2011]. Для каждого 12-минутного интервала проверялись следующие условия: $SML > -50$ нТл для всех наблюдаемых интервалов, предшествующих рассматриваемому (и включая рассматриваемый), на протяжении часа для отбора интервалов спокойной геомагнитной обстановки; $SML < -200$ нТл для отбора интервалов высокой геомагнитной активности за час до исследуемого интервала. Далее будет показано, что, несмотря на ограниченную применимость выбранных критериев, удастся выделить основные особенности исследуемых характеристик от плазменного параметра.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Ниже представлены полученные результаты анализа зависимостей исследуемых величин от плазменного параметра β . Были построены графики зависимости диагональных компонент коэффициента вихревой диффузии D от β . На рис. 1 показаны зависимости $D(\beta)$ при различных направлениях ММП: южном (a — $B_z < 0$) и северном (b — $B_z > 0$). На рис. 2

показаны зависимости $D(\beta)$ от геомагнитной активности: в возмущенных (a — $SML < -200$ нТл) и спокойных условиях (b — $SML > -50$ нТл) (интервалы -200 нТл $< SML < -50$ нТл не рассматривались). Цифры в верхней части панелей показывают число проанализированных интервалов при разбиении по значению β . Красные кружки соответствуют исследуемому параметру по x , зеленые треугольники — по y , синие квадраты — по z .

Анализ рис. 1, 2 показывает существование довольно четкой зависимости диагональных компонент $D(\beta)$: при $\beta < 1$ его рост сопровождается ростом D , а при $\beta \geq 1$ $D = const$. При этом во время ММП $B_z < 0$ и $\beta < 1$ $D_{xx} > D_{yy} > D_{zz}$, а при ММП $B_z > 0$ и $\beta < 1$ $D_{xx} \sim D_{yy} > D_{zz}$. В области больших β , т. е. близко к экваториальной плоскости плазменного слоя почти всегда $D_{zz} < D_{xx}, D_{yy}$. Диффузия по x , как правило, преобладает над диффузией по y , но иногда наблюдаются области с высокой диффузией по y , что может соответствовать событиям диффузионного проникновения плазмы магнитосферы внутрь плазменного слоя с боков магнитосферы [Antonova, 2006]. Подобные выводы можно сделать при анализе зависимостей D от уровня геомагнитной активности по SML -индексу, что связано с тесной зависимостью уровня геомагнитной активности от направления северо-южной компоненты магнитного поля в солнечном ветре. Некоторые небольшие расхождения, видимо, связаны со статистикой отобранных событий.

Прояснение природы наблюдаемых закономерностей требует отдельного анализа среднеквадратичной гидродинамической скорости плазмы v_{rms} и времени автокорреляции τ .

На рис. 3 показаны усредненные зависимости v_{rms} в трех направлениях при ММП $B_z < 0$ (a), ММП $B_z > 0$ (b), а на рис. 4 — при $SML < -200$ нТл (a), $SML > -50$ нТл (b).

При рассмотрении зависимости $v_{rms}(\beta)$ от направления B_z ММП можно отметить увеличение примерно в два раза значений компонент v_{rms} при южной ориентации ММП по сравнению с северной. Характер зависимости изменяется также при различных геомагнитных условиях: более высокие значения компонент v_{rms} наблюдаются при возмущенных геомагнитных условиях.

На рис. 5 показаны усредненные зависимости $\tau_{auto}(\beta)$ в трех направлениях при ММП $B_z < 0$ (рис. 5, a), ММП $B_z > 0$ (рис. 5, b), а на рис. 6 — при $SML < -200$ нТл (a), $SML > -50$ нТл (b).

Анализ рис. 5, 6 показывает отсутствие существенных различий в зависимости τ от направления ММП, уровня геомагнитной активности и плазменного параметра. Отсюда следует, что основной вклад в вариации коэффициента турбулентной диффузии D вносит уровень флуктуаций гидродинамических скоростей плазмы v_{rms} .

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Проведенное рассмотрение позволило выявить зависимость диагональных компонент тензора вихревой диффузии от плазменного параметра и отследить существование такой зависимости для v_{rms} и τ

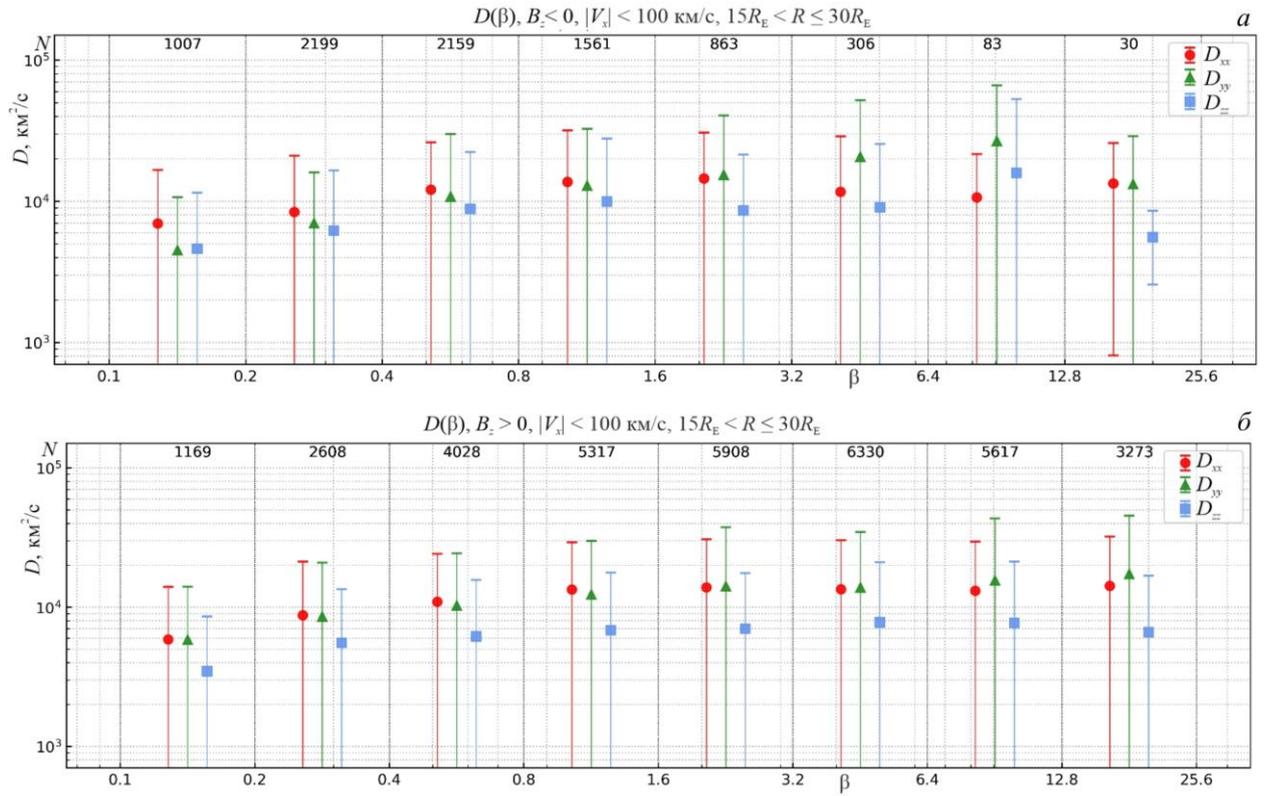


Рис. 1. Зависимость коэффициента вихревой диффузии D от плазменного параметра β при различных направлениях ММП: $B_z < 0$ (а); $B_z > 0$ (б)

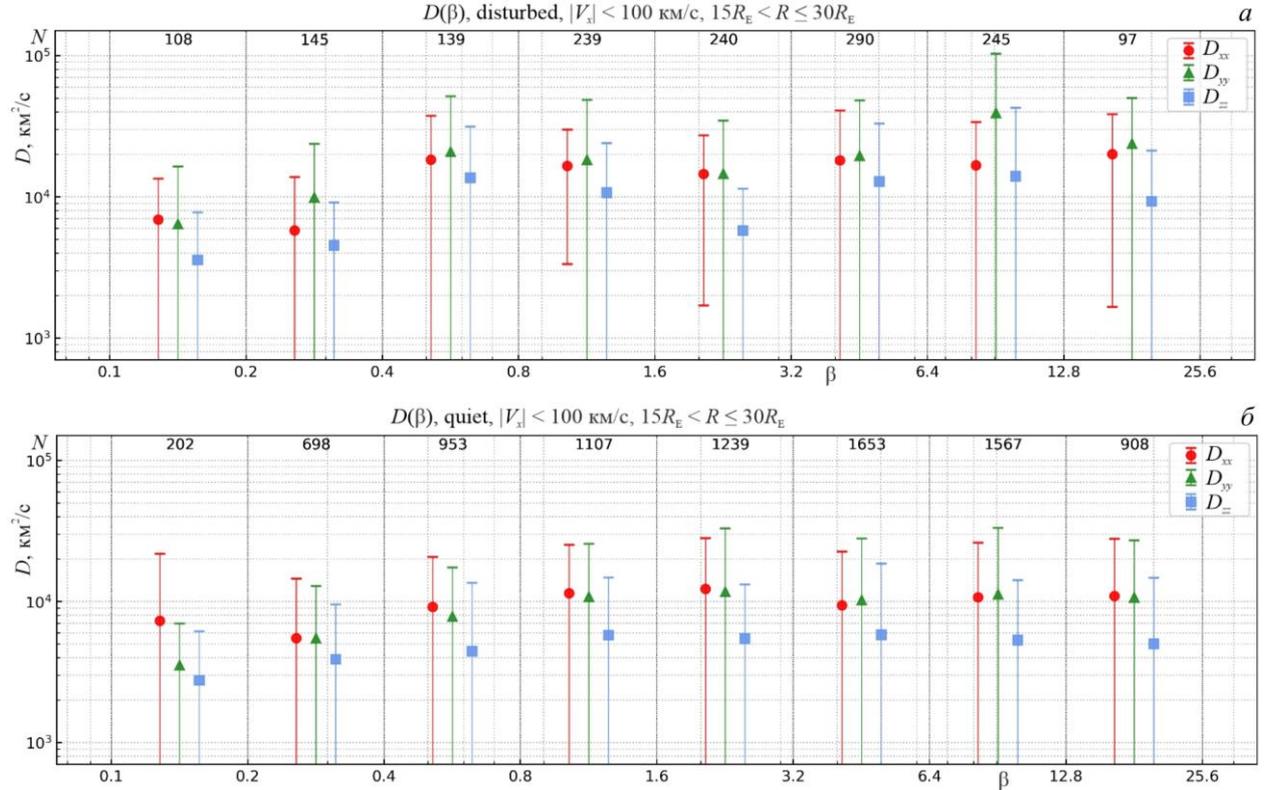


Рис. 2. То же, что на рис. 1, при различных геомагнитных условиях: $SML < -200$ нТл (а), $SML > -50$ нТл (б)

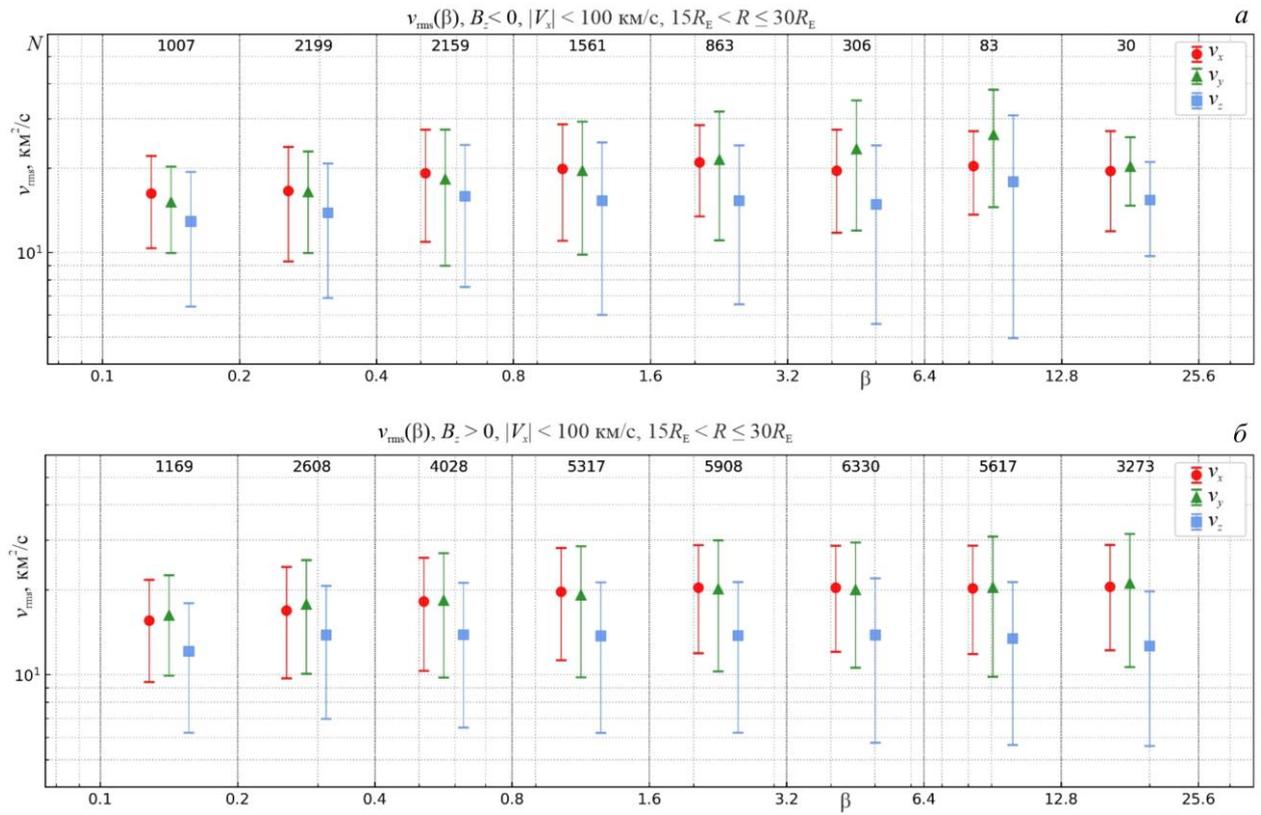


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичной скорости $v_{rms}(\beta)$ при $B_z < 0$ (а); $B_z > 0$ (б)

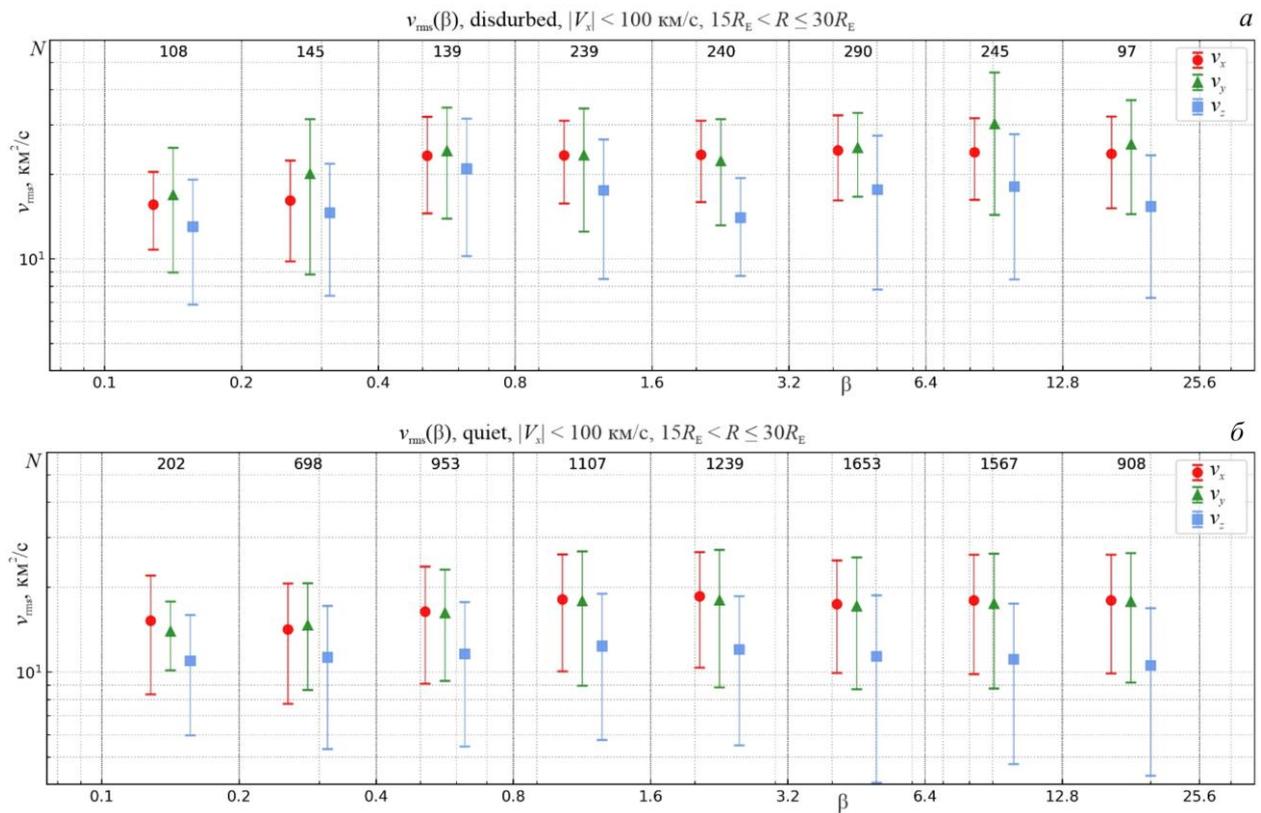


Рис. 4. То же, что на рис. 3, при $SML < -200 \text{ нТл}$ (а); $SML > -50 \text{ нТл}$ (б)

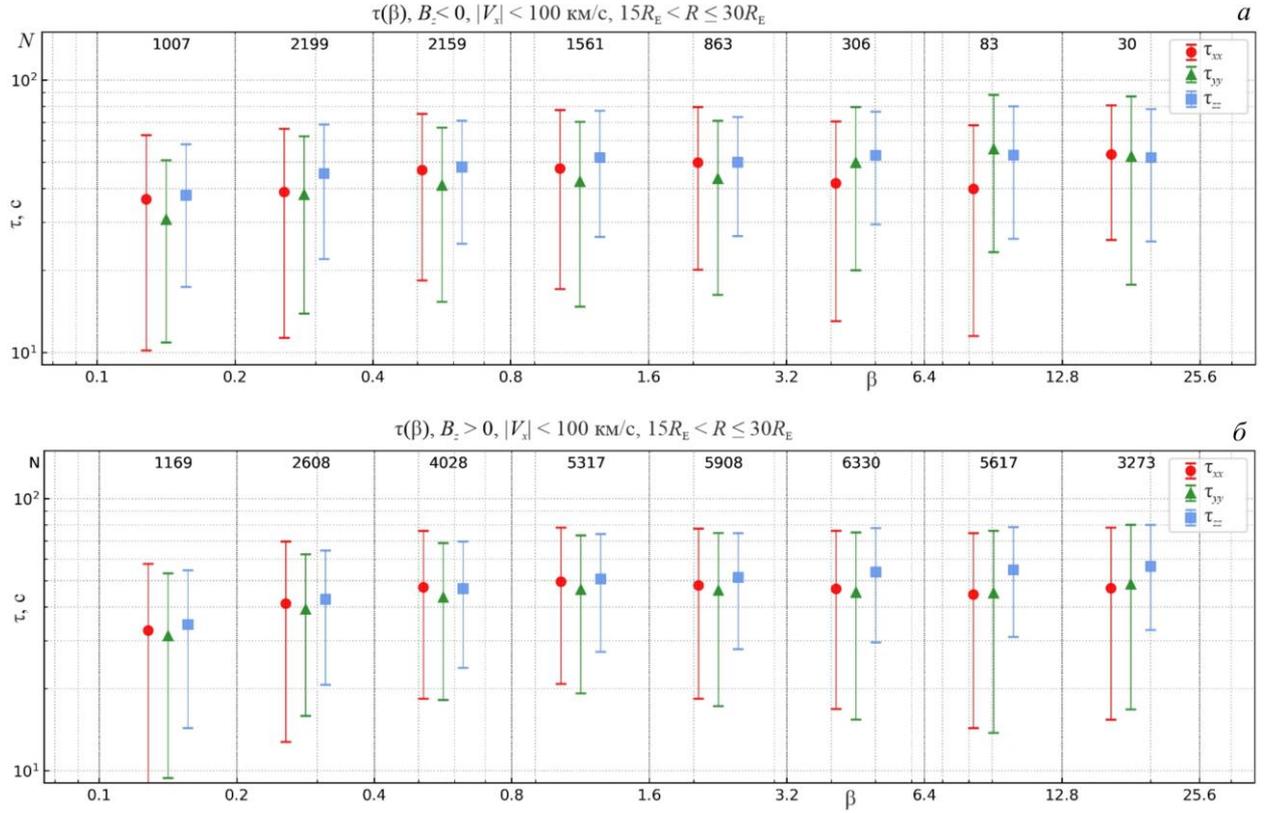


Рис. 5. Зависимость автокорреляционного времени $\tau_{\text{auto}}(\beta)$ при $B_z < 0$ (a); $B_z > 0$ (б)

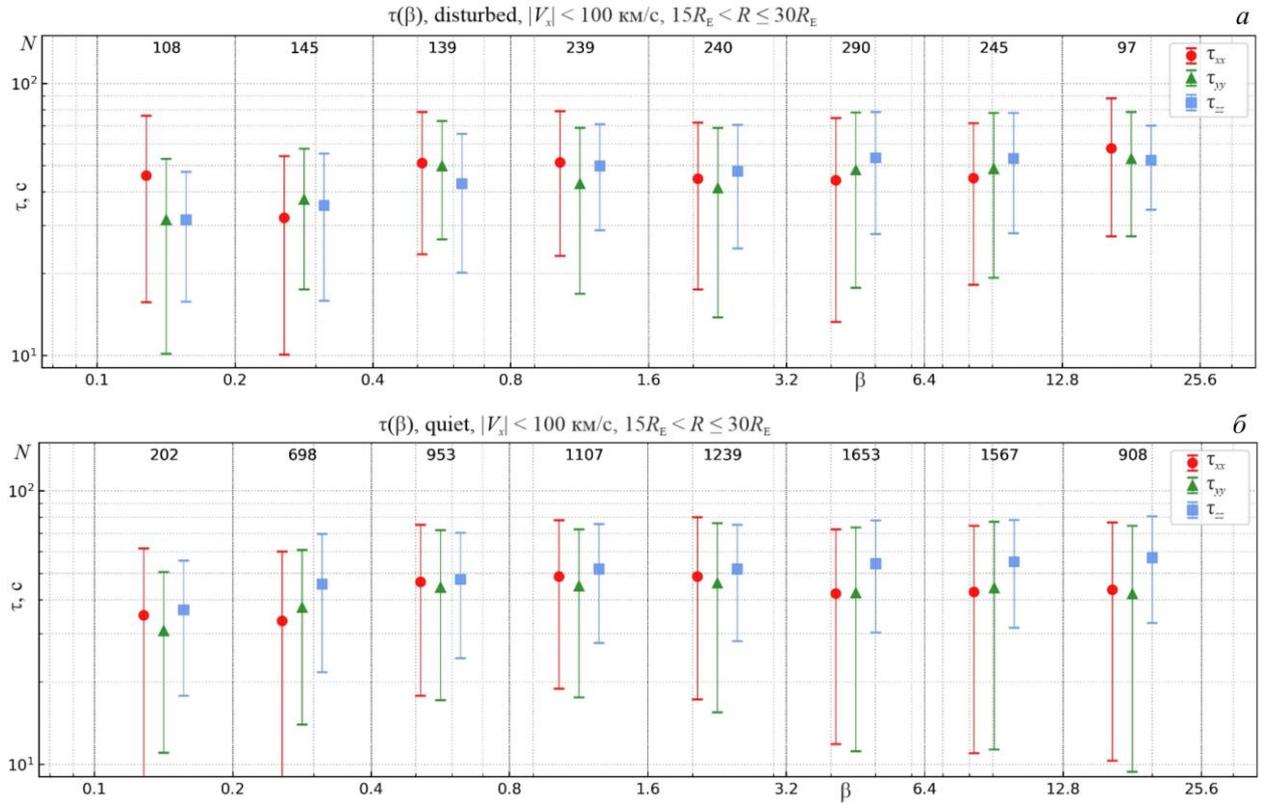


Рис. 6. То же, что на рис. 5, при $SML < -200$ нТл (a); $SML > -50$ нТл (б)

на геоцентрических расстояниях от $15R_E$ до $30R_E$. Данный диапазон геоцентрических расстояний не включает область окружающего Землю плазменного кольца, внешняя граница которого находится не далее $13R_E$ в ночные часы (см. [Eyelade et al., 2024a, b]

и ссылки в данных работах). На исследованных геоцентрических расстояниях вблизи экватора сосредоточена основная часть тока хвоста, замыкающегося токами на магнитопаузе. Выявленные зависимости от плазменного параметра полезны для планируе-

мой переработки теории формирования плазменного слоя в условиях магнитостатического равновесия поперек слоя, так как разработанная в конце 90-х годов теория [Антонова, Овчинников, 1996; Antonova, Ovchinnikov, 1996, 1999] не учитывала зависимости коэффициентов вихревой диффузии от β . Теория позволяла описывать утончение плазменного слоя во время подготовительной фазы суббури и его утолщение во время фазы восстановления, объясняла разрушение плазменного слоя, заполнение долей хвоста и появление тета-авроры при северной ориентации ММП. Однако при создании трехмерной версии модели возник ряд трудностей, связанных с проецированием крупномасштабного электрического поля утро–вечер из ионосферы в хвост магнитосферы, преодоление которых с учетом новой информации может уточнить предсказания модели.

Проведенное исследование представляет также интерес для описания процессов формирования турбулентного следа за обтекаемым препятствием в бесстолкновительной плазме. Хорошо известно, что развитие гидродинамических неустойчивостей определяется величиной плазменного параметра. Так, например, при малых значениях β рассматривается желобковая или перестановочная неустойчивость, а при β , сравнимых с единицей, развиваются баллонные моды, в последнее десятилетие широко обсуждаемые при анализе магнитосферных суббурь. Развитие универсальных дрейфовых мод также сильно зависит от β . Возрастание D при росте β и его независимость от β при $\beta > 1$ выделяет область с большими β вблизи центра плазменного слоя как область с особыми условиями при формировании спектров турбулентности хвоста.

Полученные результаты интересны также при описании турбулентного транспорта в хвосте магнитосферы Земли. Качественное совпадение зависимостей $D(\beta)$ при южной ориентации ММП и повышенной геомагнитной активности и такое же совпадение при северной ориентации ММП и спокойных геомагнитных условиях свидетельствует не только о роли ориентации ММП в определении уровня геомагнитной активности, но также о глубокой связи турбулентного транспорта в направлениях X, Y и Z в геомагнитном хвосте. В целом это доказывает существенную роль процессов турбулентного переноса в формировании магнитосферы и характеристик геомагнитной активности, как это предполагалось еще в первых публикациях [Антонова, 1985; Montgomery, 1987].

Проведенное статистическое исследование в целом подтверждает полученные ранее результаты и позволяет выявить ряд новых особенностей турбулентного транспорта в хвосте магнитосферы Земли. Для количественной проверки предложенной в работах [Антонова, Овчинников, 1996; Antonova, Ovchinnikov, 1996, 1999] модели равновесия турбулентного плазменного слоя нужно к измерениям коэффициентов вихревой диффузии добавить оценки крупномасштабных электростатических полей конвекции, возникающих при замыкании в высокоширотной ионосфере крупномасштабных продольных токов. Последнее требует включения анализа распределения полей конвекции в полярной шапке по данным радаров. Дальнейшие

исследования предполагают более детальный анализ зависимости коэффициентов вихревой диффузии от фаз суббури. При этом предполагается обратить особое внимание на периоды утончения плазменного слоя.

Авторы благодарны коллективу проекта MMS [<https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/data/>] за возможность использования данных, а также создателям базы данных OMNI [<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>] и проекта SuperMAG [<https://supermag.jhuapl.edu/info/>].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-22-00076 [<https://rscf.ru/project/23-22-00076/>]. Найко Д.Ю. является стипендиатом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антонова Е.Е. О неадиабатической диффузии, выравнивании концентрации и температуры в плазменном слое магнитосферы Земли. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 1985. Т. 25, № 4. С. 623–627.

Антонова Е.Е., Овчинников И.Л. Равновесие турбулентного токового слоя и токовый слой хвоста магнитосферы Земли. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 1996. Т. 36, № 5. С. 7–14.

Ермолаев Ю.И., Петрукович А.А., Зеленый Л.М. и др. Исследования структуры и динамики плазменного слоя в эксперименте Коралл проекта Интербол. *Космические исследования*. 2000. Т. 38, № 1. С. 16–22.

Найко Д.Ю., Овчинников И.Л., Антонова Е.Е. Пространственное распределение коэффициента вихревой диффузии в плазменном слое хвоста магнитосферы Земли и его зависимость от межпланетного магнитного поля и геомагнитной активности по данным MMS. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2024. Т. 64, № 2. С. 172–179. DOI: [10.1134/S0016793223600996](https://doi.org/10.1134/S0016793223600996).

Овчинников И.Л., Антонова Е.Е. Турбулентный транспорт магнитосферы Земли: обзор результатов наблюдений и моделирования. *Геомагнетизм и аэронавтика*. 2017. Т. 57, № 6. С. 706–714. DOI: [10.7868/S0016794017060086](https://doi.org/10.7868/S0016794017060086).

Овчинников И.Л., Антонова Е.Е., Ермолаев Ю.И. Определение коэффициента турбулентной диффузии в плазменном слое по данным проекта ИНТЕРБОЛ. *Космические исследования*. 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). *Космические исследования*. 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. *Космические исследования*. 2024. Т. 62, № 1. С. 13–35. DOI: [10.31857/S0023420624010021](https://doi.org/10.31857/S0023420624010021).

Рахманова Л.С., Хохлачев А.А., Рязанцева М.О. и др. Развитие турбулентности за околосолнечной ударной волной в периоды спокойного и возмущенного солнечного ветра. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, no 2. С. 15–28. DOI: [10.12737/szf-102202402](https://doi.org/10.12737/szf-102202402). (Rakhmanova L.S., Khokhlahev A.A., Riazantseva M.O., Yermolaev Yu.I., Zastenker G.N. Development of turbulence behind a near-Earth shock wave during periods of calm and disturbed solar wind. *Solar-Terr. Phys.* 2024. Vol. 10, no. 2. P. 15–28. DOI: [10.12737/stp-102202402](https://doi.org/10.12737/stp-102202402)).

Alexandrova O., Chen C.H.K., Sorriso-Valvo L., et al. Solar wind turbulence and the role of ion instabilities. *Space Sci. Rev.* 2013. Vol. 178. P. 101–139. DOI: [10.1007/s11214-013-0004-8](https://doi.org/10.1007/s11214-013-0004-8).

- Angelopoulos V., Kennel C.F., Coroniti F.V., et al. Characteristics of ion flow in the quiet state of the inner plasma sheet. *Geophys. Res. Lett.* 1993. Vol. 20, no 16. P. 1711–1714. DOI: [10.1029/93GL00847](https://doi.org/10.1029/93GL00847).
- Angelopoulos V., Mukai T., Kokubun S. Evidence for intermittency in Earth's plasma sheet and implications for self-organized criticality. *Phys. Plasmas*. 1999. Vol. 6, no 11. P. 4161–4168. DOI: [10.1063/1.873681](https://doi.org/10.1063/1.873681).
- Antonova E.E. Quasiturbulent transport and LLBL properties. *Adv. Space Res.* 2006. Vol. 37. P. 532–536. DOI: [10.1016/j.asr.2006.01.019](https://doi.org/10.1016/j.asr.2006.01.019).
- Antonova E.E., Ovchinnikov I.L. Turbulent current sheets and magnetospheric substorms. *Proc. International Conference on Substorms. Versailles, 12–17 May 1996. ESA SP-389. Paris: European Space Agency, 1996. P. 255.*
- Antonova E.E., Ovchinnikov I.L. Magnetically equilibrated plasma sheet with developed medium-scale turbulence: structure and implications for substorm dynamics. *J. Geophys. Res.* 1999. Vol. 104, no. A8. P. 17289–17297. DOI: [10.1029/1999JA900141](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.* 2021. Vol. 8. 622570. DOI: [10.3389/fspas.2021.622570](https://doi.org/10.3389/fspas.2021.622570).
- Borovsky J.E. Plasma and magnetic-field structure of the solar wind at inertial-range scale. Sizes discerned from statistical examinations of the time-series measurements. *Front. Astron. Space Sci.* 2020. Vol. 7. 20. DOI: [10.3389/fspas.2020.00020](https://doi.org/10.3389/fspas.2020.00020).
- Borovsky J.E., Funsten H.E. MHD turbulence in the Earth's plasma sheet: Dynamics, dissipation and driving. *J. Geophys. Res.* 2003. Vol. 107, no. A7. DOI: [10.1029/2002JA009625](https://doi.org/10.1029/2002JA009625).
- 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. Vol. 57, no. 1. P. 1–34. DOI: [10.1017/S0022377896005259](https://doi.org/10.1017/S0022377896005259).
- Borovsky J.E., Thomsen M.F., Elphic R.C. The driving of the plasma sheet by the solar wind. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103, no. A8. P. 17617–17639. DOI: [10.1029/97JA02986](https://doi.org/10.1029/97JA02986).
- Bruno R., Carbone V. The Solar Wind as a Turbulence Laboratory. *Living Rev. Solar Phys.* 2013. Vol. 10. P. 1–208. DOI: [10.12942/lrsp-2013-2](https://doi.org/10.12942/lrsp-2013-2).
- Budaev V.P., Zeleny L.M., Savin S.P. Generalized self-similarity of intermittent plasma turbulence in space and laboratory plasmas. *J. Plasma Phys.* 2015. Vol. 81. 395810602. DOI: [10.1017/S0022377815001099](https://doi.org/10.1017/S0022377815001099).
- Burch J.L., Moore T.E., Torbert R.B., Giles B.L. Magnetospheric Multiscale overview and science objectives. *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 199, no. 1–4. P. 5–21. DOI: [10.1007/s11214-015-0164-9](https://doi.org/10.1007/s11214-015-0164-9).
- Eyelade A.V., Espinoza C.M., Stepanova M., et al. 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.* 2021. Vol. 8. 647121. DOI: [10.3389/fspas.2021.647121](https://doi.org/10.3389/fspas.2021.647121).
- Eyelade A.V., Stepanova M., Espinoza C.M., et al. The response of the Earth magnetosphere to changes in the solar wind dynamic pressure: 1. Plasma and magnetic pressures. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2024a. Vol. 129. e2023JA031948. DOI: [10.1029/2023JA031948](https://doi.org/10.1029/2023JA031948).
- Eyelade A.V., Stepanova M., Espinoza C.M., et al. The response of the magnetosphere to changes in the solar wind dynamic pressure: 2. Ion and electron kappa distribution functions. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2024b. Vol. 129. e2023JA031949. DOI: [10.1029/2023JA031949](https://doi.org/10.1029/2023JA031949).
- Iijima T., Potemra T.A. The amplitude distribution of field-aligned currents at northern high latitudes observed by Triad. *J. Geophys. Res.* 1976. Vol. 81, no.13. P. 2165–2174. DOI: [10.1029/JA081i013p02165](https://doi.org/10.1029/JA081i013p02165).
- Montgomery D. Remarks on the MHD problem of generic magnetospheres and magnetotails. *Magnetotail Phys.* Johns Hopkins University Press, Baltimore. Md. 1987. P. 203–204.
- Nagata D., Machida S., Ohtani S., et al. Solar wind control of plasma number density in the near Earth plasma sheet: three-dimensional structure. *Ann. Geophys.* 2008. Vol. 26, no. 12. P. 4031–4049. DOI: [10.5194/angeo-26-4031-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-4031-2008).
- Newell P.T., Gjerloev J.W. Evaluation of SuperMAG auroral electrojet indices as indicators of substorms and auroral power. *J. Geophys. Res.* 2011. Vol. 116. A12211. DOI: [10.1029/2011JA016779](https://doi.org/10.1029/2011JA016779).
- 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. Vol. 30, no. 7. P. 1821–1824. DOI: [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. Vol. 73, no. 7. P. 1472–1477. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.05.007](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.05.007).
- Podesta J.J., Borovsky J.E. Scale invariance of normalized cross-helicity throughout the inertial range of solar wind turbulence. *Phys. Plasmas*. 2010. Vol. 17, no 11. 112905. DOI: [10.1063/1.3505092](https://doi.org/10.1063/1.3505092).
- Pollock C., Moore T., Jacques A., et al. Fast plasma investigation for magnetospheric multiscale. *Space Sci. Rev.* 2016. Vol. 199, no. 1–4. P. 331–406. DOI: [10.1007/s11214-016-0245-4](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4).
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., Verigin M. Kinetic-scale ion flux fluctuations behind the quasi-parallel and quasi-perpendicular bow shock. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2018. Vol. 123, no. 7. P. 5300–5314. DOI: [10.1029/2018JA025179](https://doi.org/10.1029/2018JA025179).
- Rakhmanova L., Riazantseva M., Zastenker G., et al. Dynamics of plasma turbulence at Earth's bow shock and through the magnetosheath. *Astrophys. J.* 2020. Vol. 901, no. 30. DOI: [10.3847/1538-4357/abae00](https://doi.org/10.3847/1538-4357/abae00).
- Riazantseva M., Budaev V., Rakhmanova L., et al. Variety of shapes of solar wind ion flux spectra: Spektr-R measurements. *J. Plasma Phys.* 2017. Vol. 83, no. 04. 705830401. DOI: [10.1017/S0022377817000502](https://doi.org/10.1017/S0022377817000502).
- Sahraoui F., Hadid L., Huang S. Magneto-hydrodynamic and kinetic scale turbulence in the near-Earth space plasmas: a (short) biased review. *Rev. Modern Plasma Phys.* 2020. Vol. 4, no. 4. DOI: [10.1007/s41614-020-0040-2](https://doi.org/10.1007/s41614-020-0040-2).
- Stepanova M., Antonova E.E. Modeling of the turbulent plasma sheet during quiet geomagnetic conditions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2011. Vol. 73, no. 8. P. 1636–1642. DOI: [10.1016/j.jastp.2011.02.009](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2011.02.009).
- Stepanova M.V., Vucina-Parga T., Antonova E.E., et al. 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. Vol. 67, no. 11. P. 1815–1820. DOI: [10.1016/j.jastp.2005.01.013](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.013).
- Stepanova M., Antonova E.E., Paredes-Davis D., et al. Spatial variation of eddy-diffusion coefficients in the turbulent plasma sheet during substorms. *Ann. Geophys.* 2009. Vol. 27, no. 4. P. 1407–1411. DOI: [10.5194/angeo-27-1407-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-1407-2009).
- 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. Vol. 116, no. 1. DOI: [10.1029/2010JA015887](https://doi.org/10.1029/2010JA015887).
- 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. Vol. 199, no. 1–4. P. 105–135. DOI: [10.1007/s11214-014-0109-8](https://doi.org/10.1007/s11214-014-0109-8).
- Troshichev O.A., Antonova E.E., Kamide Y. Inconsistency of magnetic field and plasma velocity variations in the distant plasma sheet: violation of the “frozen-in” criterion? *Adv. Space Res.* 2002. Vol. 30, no 12. P. 2683–2687. DOI: [10.1016/S0273-1177\(02\)80382-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(02)80382-9).
- Tu C.Y., Marsch E. Magneto-hydrodynamic structures waves and turbulence in the solar wind: Observations and

theories. *Space Sci. Rev.* 1995. Vol. 73, no. 1-2. P. 1–210. DOI: [10.1007/BF00748891](https://doi.org/10.1007/BF00748891).

Volwerk M., Vörös Z., Baumjohann W., et al. Multi-scale analysis of turbulence in the Earth's current sheet. *Ann. Geophys.* 2004. Vol. 22, no. 7. P. 2525–2533. DOI: [10.5194/angeo-22-2525-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-2525-2004).

Vörös W., Baumjohann W., Nakamura R., et al. Multi-scale magnetic field intermittence in the plasma sheet. *Ann. Geophys.* 2003. Vol. 21, no. 9. P. 1955–1964. DOI: [10.5194/angeo-21-1955-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-1955-2003).

Vörös Z., Baumjohann W., Nakamura R., et al. Magnetic turbulence in the plasma sheet. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109, no. 11. DOI: [10.1029/2004JA010404](https://doi.org/10.1029/2004JA010404).

Vörös Z., Baumjohann W., Nakamura R., et al. Bursty bulk flow driven turbulence in the Earth's plasma sheet. *Space Sci. Rev.* 2006. Vol. 122, no. 1-4. P. 301–311. DOI: [10.1007/s11214-006-6987-7](https://doi.org/10.1007/s11214-006-6987-7).

Vörös Z., Baumjohann W., Nakamura R., et al. Spatial structure of plasma flow associated turbulence in the Earth's plasma sheet. *Ann. Geophys.* 2007. Vol. 25, no. 2. P. 13–17. DOI: [10.5194/angeo-25-13-2007](https://doi.org/10.5194/angeo-25-13-2007).

Wang C.-P., Lyons L.R., Nagai T., et al. Evolution of plasma sheet particle content under different interplanetary magnetic field conditions. *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115, no. 6. DOI: [10.1029/2009JA015028](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. Vol. 110, no. 2. DOI: [10.1029/2004JA010581](https://doi.org/10.1029/2004JA010581).

Yordanova E., Vaivads A., André M., Buchert S.C., Vörös Z. Magnetosheath plasma turbulence and its spatiotemporal evolution as observed by the Cluster spacecraft. *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 100. 205003. DOI: [10.1103/PHYSREVLETT.100.205003](https://doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.100.205003).

URL: <https://lasp.colorado.edu/mms/sdc/public/data/> (дата обращения 26 ноября 2024 г.).

URL: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 26 ноября 2024 г.).

URL: <https://supermag.jhuapl.edu/info/> (дата обращения 26 ноября 2024 г.).

URL: <https://rscf.ru/project/23-22-00076/> (дата обращения 26 ноября 2024 г.).

Как цитировать эту статью:

Найко Д.Ю., Овчинников И.Л., Антонова Е.Е. Зависимость коэффициента вихревой диффузии от плазменного параметра β в хвосте магнитосферы Земли. *Солнечно-земная физика*. 2025. Т. 11, № 1. С. 31–40. DOI: [10.12737/szf-111202503](https://doi.org/10.12737/szf-111202503).