

На правах рукописи



Малыхин Андрей Юрьевич

**ПЛАЗМЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ,
СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ПРОЦЕСС
ДИПОЛИЗАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В
ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ**

Специальность 01.03.03 —

«Физика Солнца»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Григоренко Елена Евгеньевна

Официальные оппоненты: **Сергеев Виктор Андреевич**,
доктор физико-математических наук, профессор,
Кафедра физики Земли физического факультета
СПбГУ,
Профессор

Калегаев Владимир Владимирович,
доктор физико-математических наук,
НИИЯФ МГУ Лаборатория космофизических исследований,
Заведующий лабораторией

Ведущая организация: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН)

Защита состоится **08 июня 2022 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета **Д 002.113.03** на базе Института космических исследований Российской академии наук по адресу: 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, ИКИ РАН, подъезд А2 (конференц-зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН и на сайте <http://www.iki.rssi.ru/diss/2022/malikhin.htm>.

Автореферат разослан апреля 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета **Д 002.113.03**,
кандидат физико-математических наук

Цупко О.Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Одной из актуальных проблем магнитосферной физики является проблема трансформации и переноса энергии во время резкой перестройки магнитной конфигурации хвоста, так называемой диполизации, в результате которой в плазменном слое (ПС) возрастает северная компонента (B_Z) магнитного поля. Процесс диполизации сопровождается ускорением и нагревом окружающей плазмы, изменением анизотропии ионной и электронной функции распределения по скоростям и генерацией различных волновых мод. Эти процессы, происходящие в области ближнего хвоста, в конечном счёте могут оказывать влияние на динамику внутренней магнитосферы и геомагнитную активность.

В последние десятилетия благодаря наличию многоспутниковых измерений *Cluster* и THEMIS было показано, что в результате магнитного пересоединения и/или развития плазменных неустойчивостей в токовом слое могут генерироваться локализованные магнитоплазменные структуры, характеризующиеся резким возрастанием (B_Z)-компоненты магнитного поля (диполизационные фронты). Диполизационные фронты (ДФ) являются достаточно устойчивыми магнитными структурами и могут распространяться в ближнюю область хвоста вместе с быстрым плазменным потоком [1]. Достигая этой области, быстрые потоки испытывают торможение, в результате чего происходит накопление магнитного потока и развитие более крупномасштабной и продолжительной диполизации магнитной конфигурации хвоста [2]. Несмотря на то, что изолированные ДФ достаточно хорошо изучены, продолжительные диполизации представляют собой более сложный и многомасштабный процесс, некоторые составляющие которого до сих пор не изучены.

Спутниковые наблюдения THEMIS и *Cluster* позволили изучать процесс диполизации на МГД и ионных кинетических масштабах. Однако эти спутниковые наблюдения не позволяли исследовать процессы трансформации энергии на электронных кинетических масштабах. Также, ввиду недостаточно высокого временного разрешения плазменных измерений, были недоступны для наблюдений процессы взаимодействия волн и частиц на временных масштабах, сопоставимых с длительностями волновых всплесков (\sim нескольких секунд). Многоспутниковая миссия MMS, запущенная в

2015 г. и предназначенная для исследования плазменных процессов на электронных масштабах, впервые позволяет изучить тонкую магнитоплазменную и токовую структуру, а также процессы взаимодействия волн и частиц во время продолжительных диполизаций в ближнем хвосте. В этой связи данная диссертация является актуальной, т.к. посвящена исследованию магнитной и токовой структуры зоны диполизации, а также проблеме ускорения частиц и взаимодействия свистовых волн с электронами на электронных и ионных кинетических масштабах на основе наблюдений многоспутниковых миссий MMS и *Cluster*.

Цели диссертации

1. Определить пространственные масштабы магнитных и токовых структур, наблюдаемых во время продолжительных диполизаций, и выяснить роль электронной компоненты плазмы в формировании этих токовых структур.
2. Определить возможные механизмы, ответственные за возрастания потоков сверхтепловых электронов и ионов разных масс во время продолжительных диполизаций.
3. Используя измерения MMS, определить энергетические и питч-угловые характеристики резонансных электронов, участвующих во взаимодействии со свистовыми волнами во время продолжительных диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте.

Научная новизна:

Все результаты, представленные в диссертации, являются новыми. К ним относятся следующие выводы:

1. Впервые показано, что помимо крупномасштабной структуры продолжительной диполизации, также наблюдаются значительные магнитные градиенты и интенсивные токовые структуры на субионных и электронных масштабах. Последние имеют сложную трёхмерную структуру, связанную с импульсами V_Z -компоненты магнитного поля, наблюдаемыми во время продолжительной диполизации.
2. Используя наблюдения Cluster, экспериментально подтверждено неадиабатическое ускорение ионов разных масс до энергий ≥ 600 кэВ посредством резонансного взаимодействия с ДФ во время про-

должительных диполизаций. Статистически установлено, что ускорение протонов происходит в течение $\sim 1-2$ минут, а ускорение ионов O^+ занимает более продолжительное время. Также показано, что тяжёлые ионы ускоряются более эффективно, чем лёгкие ионы.

3. Впервые показано, что ускорением за счёт бетатронного механизма во время диполизаций можно объяснить возрастание потоков электронов с энергиями до ~ 90 кэВ.
4. Для продолжительных диполизаций впервые определены энергетические и питч-угловые характеристики электронов, резонансно взаимодействующих с квазипараллельными свистовыми волнами. Также впервые экспериментально показано, что во время продолжительных диполизаций энергия может передаваться от менее энергичных электронов к более энергичным посредством взаимодействия со свистовыми волнами.

Практическая значимость

Продолжительные диполизации в ближнем геомагнитном хвосте могут представлять собой важное связующее звено между взрывным процессом высвобождения накопленной энергии солнечного ветра в токовом слое (ТС) хвоста магнитосферы Земли и развитием суббури [3]. В этой связи понимание процессов трансформации и передачи энергии во время диполизации имеет важное научное и практическое значение.

Полученные в данной работе экспериментальные подтверждения роли электронной плазменной популяции в формировании мелкомасштабных трёхмерных токовых структур во время диполизации дают стимул для разработки новых теоретических моделей диполизаций.

Определение временных масштабов ускорения и характерных энергий, до которых могут быть ускорены ионы разных масс и электроны во время диполизаций, даёт информацию о том, на каких энергиях можно ожидать возрастание потоков данных плазменных компонент вблизи геостационарной орбиты.

Определение энергетических и питч-угловых характеристик резонансных электронов, взаимодействующих с квазипараллельными свистовыми волнами, даёт информацию о том, какая часть электронной популяции потенци-

ально может быть рассеяна в конус потерь и дать вклад в высыпания электронов в авроральной области.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. По наблюдениям миссий Cluster и MMS установлена многомасштабная магнитная структура зоны диполизации. Показано, что интенсивные токовые структуры, формируемые на множественных фронтах, составляющих диполизацию, имеют субионные масштабы, соответствующие долям гирорадиуса тепловых протонов. Показано, что основным переносчиком тока в таких структурах являются электроны.
2. Впервые статистически установлено, что во время продолжительных диполизаций ускорение ионов разных масс до сверхтепловых энергий продолжается в течение нескольких минут. При этом, тяжёлые ионы испытывают более эффективное ускорение (до ~ 1 МэВ) которое наблюдается на большем временном интервале, чем ускорение лёгких ионов. Показано, что вероятным механизмом ускорения ионов может быть неадиабатическое взаимодействие со множественными движущимися ДФ на фазе плавного роста продолжительной диполизации.
3. Впервые статистически показано, что бетатронный механизм ускорения хорошо объясняет наблюдаемые возрастания потоков электронов с энергиями, не превышающими 90 кэВ во время продолжительных диполизаций. Динамика потоков электронов более высоких энергий плохо описывается бетатронным сценарием и требует учёта других, возможно, неадиабатических механизмов.
4. По наблюдениям MMS в быстрой моде измерений впервые определены характерные энергетические и питч-угловые характеристики резонансных электронов, взаимодействующих с квазипараллельными свистовыми волнами возбуждёнными за счёт локальной циклотронной неустойчивости, вызванной перпендикулярной анизотропией функции распределения электронов по скоростям в сверхтепловом (>1 кэВ) диапазоне энергий. Показано, что электроны с энергиями $W_{res} \geq 10$ кэВ и питч-углами $\alpha_{res} \sim 100^\circ - 130^\circ$ и $\alpha_{res} \sim 50^\circ - 80^\circ$ вносят максимальный положительный вклад в ин-

кремент этих волн. Энергии резонансных электронов, которые потенциально могут быть рассеяны в конус потерь во время начальной фазы диполизации, составляют $\sim 10 - 20$ кэВ.

Апробация работы.

Основные результаты работы докладывались на научных семинарах в ИКИ РАН и на следующих конференциях:

1. 13-я конференция “Физика плазмы в солнечной системе”
Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Колева Р., Кронберг Е.А., Daly P.W. “Динамика потоков сверхтепловых ионов и электронов во время магнитной диполизации в ближнем хвосте магнитосферы Земли”, Москва (2018)
2. 14-я конференция “Физика плазмы в солнечной системе”
Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Кронберг Е.А., Daly P.W. “Ускорение ионов разных масс (H^+ , He^+ , O^+) во время диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте по наблюдениям Cluster/RAPID”, Москва (2019)
3. 15-я конференция “Физика плазмы в солнечной системе”
Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Шкляр Д.Р., Лавро Б., Пену Е., Панов Е.В. “Динамика анизотропии функций распределения электронов и её связь со всплесками свистовых волн, наблюдаемых спутниками MMS на фронтах диполизаций в хвосте магнитосферы Земли”, Москва (2020)
4. 16-я конференция “Физика плазмы в солнечной системе”
Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., “Наблюдение мелкомасштабной магнитоплазменной структуры во время продолжительной диполизации в ближнем геомагнитном хвосте спутниками MMS”, Москва (2021)
5. European Geosciences Union General Assembly 2018 (EGU2018)
Andrey Malykhin, Elena Grigorenko, Elena Kronberg, Rositza Koleva, Natalia Ganushkina, Ludmila Kozak, and Patrik Daly. “Dynamics of suprathermal electron and proton fluxes during magnetotail dipolarization associated with magnetic flux pile up in the near-Earth plasma sheet”, Vienna, Austria (2018)

6. European Geosciences Union General Assembly 2018 (EGU2018)
Elena Grigorenko, Stepan Dubyagin, Andrey Malykhin, Yuri Khotyaintsev, Elena Kronberg, Benoit Lavraud, and Natalia Ganushkina “Intense current structures observed at electron scales during dipolarization and substorm current wedge formation”, Vienna, Austria (2018)
7. European Geosciences Union General Assembly 2020 (EGU2020)
Andrey Malykhin, Elena Grigorenko, Elena Kronberg, and Patrick Daly “Comparison of ion pressure variations derived from Cluster/CODIF and the combined Cluster/CODIF&RAPID data during prolonged dipolarizations in the near Earth magnetotail”, Vienna, Austria (2020)
8. IFW 2020
Malykhin A.Yu., Grigorenko E.E., Shklyar D.R., Panov E.V., Le-Contel O., Giles B., “Characteristics of resonant electrons interacting with quasi-parallel whistler waves during prolonged dipolarizations in the near-Earth magnetotail. MMS observations”, online meeting (2020)

Личный вклад автора.

Научно-исследовательская работа, результаты которой легли в основу диссертации, была выполнена автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Автор участвовал в постановке и развитии научных задач. Поиск и анализ событий по данным MMS, а также диполизаций, наблюдаемых спутниками *Cluster*, которые использовались в главах 3 и 4, был выполнен лично автором. Автором был написан пакет программ для анализа и визуализации спутниковых данных. Интерпретация полученных результатов была выполнена либо автором лично, либо совместно с соавторами.

Публикации по теме диссертации.

1. Grigorenko E.E., Dubyagin S., Malykhin A.Y., Khotyaintsev Y.V., Kronberg E.A., Lavraud B., Ganushkina N.Y., Intense current structures observed at electron kinetic scales in the near-Earth magnetotail during dipolarization and substorm current wedge

- formation. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45, 602–611.
<https://doi.org/10.1002/2017GL076303>
2. Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Наблюдения спутниками MMS мелкомасштабных магнитных и токовых структур во время продолжительных диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте, *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*, 2021, том 47, № 5, с. 401–414,
<https://doi.org/10.31857/S0367292121050061>
 3. Malykhin A.Y., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Koleva R., Ganushkina N.Y., Kozak L., Daly P.W., Contrasting dynamics of electrons and protons in the near-Earth plasma sheet during dipolarization, *Annales Geophysicae*, 36, 2018, 3, 741–760,
<https://doi.org/10.5194/angeo-36-741-2018>
 4. Malykhin A.Y., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Daly P.W., Kozak L.V., Acceleration of protons and heavy ions to suprathermal energies during dipolarizations in the near-Earth magnetotail, *Annales Geophysicae*, 37, 2019, 4, 549–559,
<https://doi.org/10.5194/angeo-37-549-2019>
 5. Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Кронберг Е.А., Дали П.В., Влияние бетатронного механизма на динамику потоков сверхтепловых электронов во время диполизаций в геомагнитном хвосте, *Геомагнетизм и Аэрномия*, 2018, том 58, № 6, с. 1–9,
<https://doi.org/10.1134/S0016794018060093>
 6. Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Шкляр Д.Р., наблюдение узкополосных квазипараллельных свистовых волн в зоне торможения быстрых потоков в ближнем геомагнитном хвосте по данным MMS, *Космические исследования*, 2021, том 59, № 1, с. 9–18
<https://doi.org/10.31857/S0023420621010052>
 7. Malykhin A.Y., Grigorenko E.E., Shklyar D.R., Panov E.V., Le-Contel O., Avakov L., Giles B. Characteristics of resonant electrons interacting with whistler waves in the nearest dipolarizing magnetotail. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, 2021,
<https://doi.org/10.1029/2021JA029440>.
 8. Kronberg E.A., Daly P.W., Grigorenko E.E., Smirnov A.G., Klecker B., Malykhin A.Y. Energetic charged particles

in the terrestrial magnetosphere: Cluster/RAPID results. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 126, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021JA029273>

Прочие публикации

1. Malykhin A.Yu., Grigorenko E.E., Kronberg E.A., Daly P.W., Variations in Ion-Component Pressure during Dipolarization in the Near-Earth Magnetotail Plasma Sheet, *Geomagnetism and Aeronomy*, 2020
2. Grigorenko E.E., Malykhin A.Y., Shklyar D.R., Fadanelli S., Lavraud B., Panov E.V., Avakov L., Giles B., Le-Contel O., Investigation of electron distribution functions associated with whistler waves at dipolarization fronts in the Earth's magnetotail: MMS observations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 125, e2020JA028268. <https://doi.org/10.1029/2020JA028268>
3. Kronberg E.A., Grigorenko E., Malykhin A., Kozak L., Petrenko B., Vogt M.F., Roussos E., Kollmann P., Jackman C.M., Kasahara S., Malova H.V., Tao C., Radioti A., Masters A., Acceleration of Ions in Jovian Plasmoids: Does Electromagnetic Turbulence Play a Role?, *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JA026553>
4. Мальныхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Малова Х.В., Исследование влияния продольной компоненты магнитного поля на динамику протонов внутри плазмоида, *Космические исследования*, 67, 4, 243-252, 2019, DOI: 10.1134/S0023420619040058
5. Kuzichev I.V., Vasko I.Yu., Malykhin A.Yu., Soto-Chavez A.R., On the ionospheric propagation of VLF waves generated by currents in the lower ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 179, 2018, Pages 138-148, ISSN 1364-6826, <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.07.002>.

6. Grigorenko E.E., Malova H.V., Malykhin A.Yu., Zelenyi L.M., A possible mechanism of the enhancement and maintenance of the shear magnetic field component in the current sheet of the Earth magnetotail component, Plasma Physics Reports 41, No.1, 88-100, 2015.
7. Grigorenko E.E., Malykhin A.Yu., Kronberg E.A., Malova Kh.V., Daly P.W., Acceleration of ions to suprathermal energies by turbulence in the plasmoidlike magnetic structures, J. Geophys. Res., 120, doi:10.1002/2015JA021314, 2015

Структура и объём диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 146 наименований. Диссертация содержит 168 страниц машинописного текста, включая 42 рисунка и 12 таблиц.

Содержание работы

Во **Введении** обсуждается актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы и положения выносимые на защиту. Также во введении изложена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Содержание **первой главы** представляет собой обзор исследований плазменных процессов, наблюдаемых во время диполизаций в геомагнитном хвосте, которые являются основным объектом изучения в данной диссертационной работе. Глава состоит из четырёх разделов. В первом разделе главы обсуждаются современные многоспутниковые наблюдения явления диполизации в геомагнитном хвосте, и её роль в динамике геомагнитного хвоста. Особое внимание уделяется обсуждению уникальных возможностей миссии MMS, которая даёт возможность впервые наблюдать быстрые плазменные процессы происходящие на электронных кинетических масштабах. Во втором и третьем разделах главы изложены современные представления о механизмах ускорения ионов и электронов во время диполизаций. В последнем разделе главы описана история изучения свистовых волн, от теоретических исследований Сагдеева и Шафранова [4], до современных спутниковых наблюдений свистовых волн, регистрируемых во время прохождения изолированных ДФ.

На Рис. 1 приведен пример наблюдения *Cluster* свистовых волн на изолированном ДФ в геомагнитном хвосте [5]. Свистовые волны наблюдаются как флуктуации электрического и магнитного полей (E и B) в диапазоне частот $\sim 0.1 f_{ce} < f < 1 f_{ce}$ (f_{ce} - электронная гирочастота) (с.м. Рис. 1b) и имеют правую, близкую к круговой поляризацию. В диссертации будут исследованы квази-параллельные свистовые волны, наблюдаемые во время продолжительных диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте и их взаимодействие с резонансными электронами по данным миссии MMS.

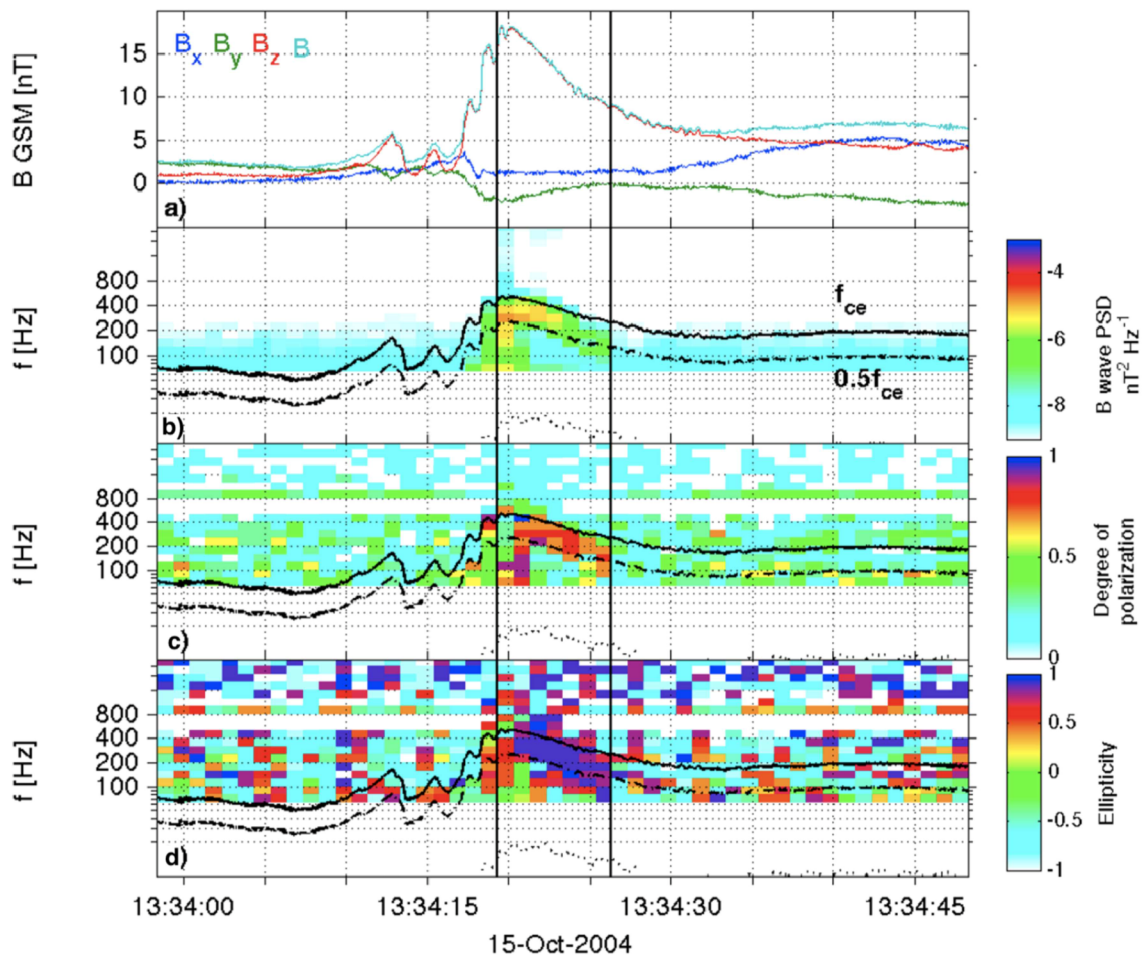


Рис. 1 — Пример наблюдения свистовых волн, наблюдаемых в окрестности ДФ. Сверху вниз показаны: (a) три компоненты и модуль магнитного поля. (b – d) Спектр мощности магнитных флуктуаций, степень поляризации и эллиптичность. Всплеск квази-параллельных свистовых волн выделен чёрными вертикальными линиями [5].

Во второй главе выполнено исследование многомасштабных магнитных структур, наблюдаемых во время продолжительных диполизаций, связанных с суббурями, на основе многоспутниковых наблюдений миссий *Cluster*

и MMS. Данная глава состоит из двух разделов. В первом разделе представлены наблюдения *Cluster* в геомагнитном хвосте в 2013 году, когда два космических аппарата из четырёх находились на субионных масштабах друг от друга. Хотя такая конфигурация не позволяла вычислить три компоненты градиента магнитного поля и плотности электрического тока, данные наблюдения впервые позволили оценить градиент магнитного поля вдоль радиус-вектора между этой парой спутников и показать наличие сильных магнитных градиентов на электронных масштабах. В результате было показано, что во время продолжительных диполизаций, особенно на фазе роста диполизации наблюдаются мелкомасштабные локальные магнитные градиенты ($\sim \lambda_e$), величина которых в несколько десятков раз превышает соответствующие значения градиентов, одновременно измеряемых на ионных масштабах. Такие нелинейные особенности в градиентах магнитного поля указывают на формирование интенсивных и локализованных токовых структур во время диполизации и образование суббурового токового клина. Полученные результаты были подтверждены статистическим исследованием 14 событий диполизации (см. Рис. 2).

Исследования, представленные в данной главе, позволили выделить три временных масштаба развития диполизации: I) продолжительный плавный рост B_Z -компоненты магнитного поля длительностью до 20 мин; II) импульсы B_Z продолжительностью ≤ 1 мин, наблюдаемые во время плавного роста B_Z ; и (III) сильные и быстрые вариации градиентов магнитного поля $|\Delta B_L/\Delta N|$ (≤ 2 с) на фронтах импульсов B_Z . Наблюдаемые величины градиентов магнитного поля на электронных масштабах указывают на возможность формирования интенсивных токовых структур, плотности тока в которых могут достигать $100 \frac{\text{нА}}{\text{м}^2}$. Позднее такие токовые структуры действительно были обнаружены на фазе роста диполизации миссией MMS на основе анализа одного события [6]. Во втором разделе данной главы рассмотрены две последовательные продолжительные диполизации в геомагнитном хвосте по наблюдениям MMS. Во время данных диполизаций наблюдались множественные ДФ со сложной токовой структурой. Были вычислены плотности токов, протекающих внутри объема тетраэдра MMS, характерный масштаб которого составлял несколько электронных гирорадиусов. Установлено, что в начале и в конце ДФ наблюдаются тонкие интенсивные токовые структуры,

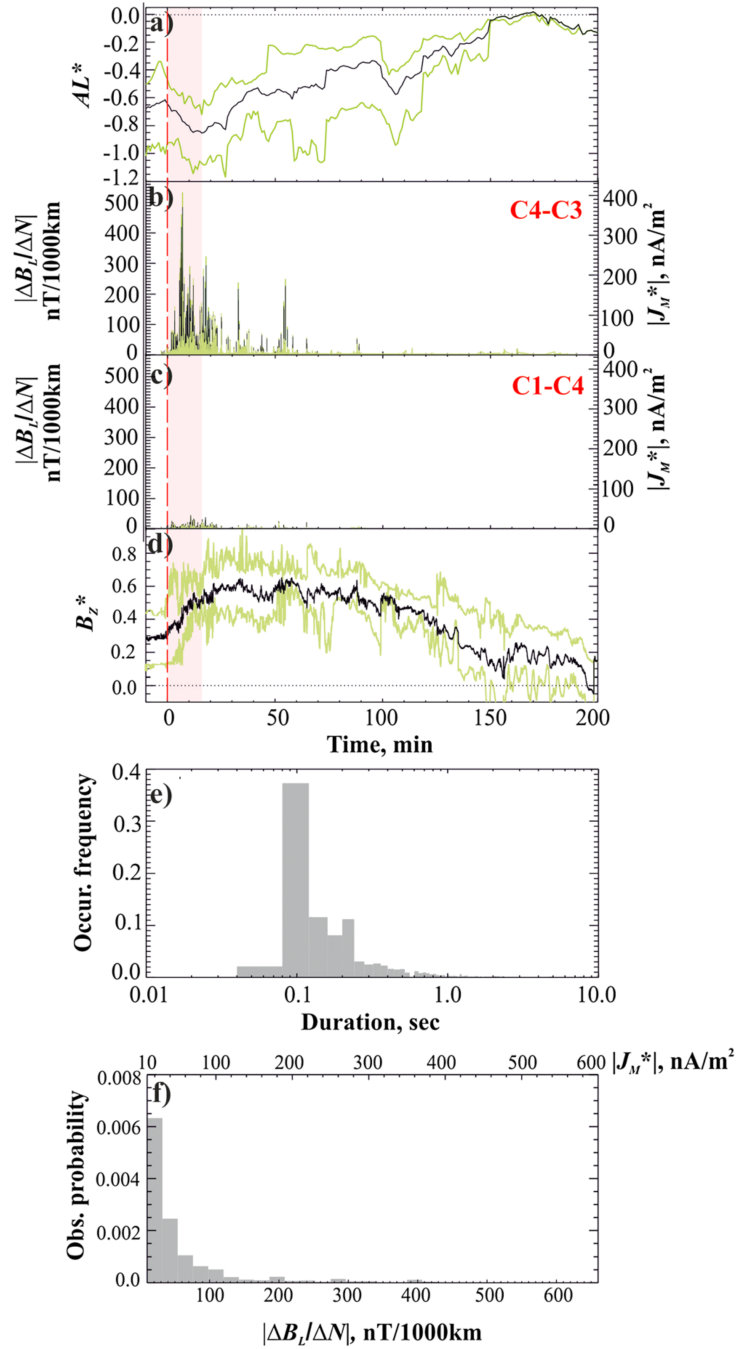


Рис. 2 — На панелях (а – d) представлены результаты анализа методом наложения эпох применённого к 14 событиям диполизации. Сверху вниз показаны: AL индекс (а); величина градиента магнитного поля вдоль нормали к ДФ $|\Delta B_L/\Delta N|$, вычисленная на электронных масштабах (b), $|\Delta B_L/\Delta N|$, вычисленная на ионных масштабах (с). Абсолютные значения плотности электрического тока $|J_M^*|$ указаны на правой вертикальной оси; $|B_Z^*|$ -компонента магнитного поля (d); распределение вероятности наблюдения сильных градиентов $|\Delta B_L/\Delta N|$ в зависимости от их длительности (e); Гистограмма распределения вероятности наблюдения данных величин $|\Delta B_L/\Delta N|$ и соответствующих значений $|J_M^*|$ (указана на верхней горизонтальной оси) (f).

плотность тока в которых варьировала от $\sim 10 \frac{\text{нА}}{\text{м}^2}$ до $\sim 60 \frac{\text{нА}}{\text{м}^2}$, а характерные пространственные масштабы таких структур составили $\sim 150 - 470$ км, что существенно меньше гирорадиуса тепловых ионов ($\leq 0.4\rho_i$). Показано, что наблюдаемые токовые структуры образуют сложную многомасштабную трехмерную конфигурацию. На головных ДФ наблюдаются более регулярные токовые структуры. Однако с ДФ, наблюдаемыми в зоне накопления магнитного потока, связаны более сложные нерегулярные токовые структуры.

В третьей главе представлены статистические исследования динамики потоков и спектров сверхтепловых ионов разных масс во время 14 диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте по наблюдениям энерго-масс спектрометров RAPID миссии *Cluster*. Было показано, что во время диполизаций в ближнем хвосте магнитосферы Земли наблюдаются возрастания потоков различных ионных компонент в следующих диапазонах энергий: $\sim 83 - 600$ кэВ для H^+ , $\sim 287 - 1100$ кэВ для He^+ и $\sim 560 - 1160$ кэВ для ионов O^+ . Показано, что такие возрастания начинались примерно за 1 мин до начала диполизации и продолжались ~ 1 мин после её начала. Одновременно с увеличением потока ионов в каналах с более высокими энергиями было обнаружено уменьшение потоков в каналах с более низкими энергиями, в результате чего наблюдалось уменьшение значения показателя степенного энергетического спектра γ . Сильные отрицательные вариации γ наблюдались в ограниченных диапазонах энергий для всех ионных компонент. Это свидетельствует о наличии неадиабатических эффектов в динамике сверхтепловых ионов, а именно неадиабатического резонансного ускорения ионов при их взаимодействии с множественными ДФ во время диполизаций. Установлена зависимость продолжительности и амплитуды отрицательных вариаций γ от массы ионов, а также показано, что в каждом событии диполизации ускорение тяжелых ионов наблюдалось в течение более длительного промежутка времени после начала диполизации, чем ускорение легких ионов. При этом, наибольшая амплитуда отрицательных вариаций γ обнаружена именно для тяжелых ионов (O^+) (см Рис. 3), что указывает на их более эффективное ускорение. Также в главе уделяется отдельное внимание динамике потоков ионов (H^+ во время продолжительных диполизаций). Показано, что резкие кратковременные возрастания потоков протонов (инжекций) наблюдаются одновременно с импульсами B_Z и электрического поля утро-вечер. Для событий диполизаций

с относительно слабыми возрастаниями электрического поля не наблюдается инъекций ни протонов, ни более тяжёлых ионов, а только продолжительное возрастание потоков сверхтепловых ионов. Подводя итог исследованиям данной главы, можно сделать вывод о том, что взаимодействие ионов со сложной магнитной структурой зоны продолжительных диполизаций может являться причиной более эффективного набора энергии, чем при их взаимодействии с изолированными ДФ.

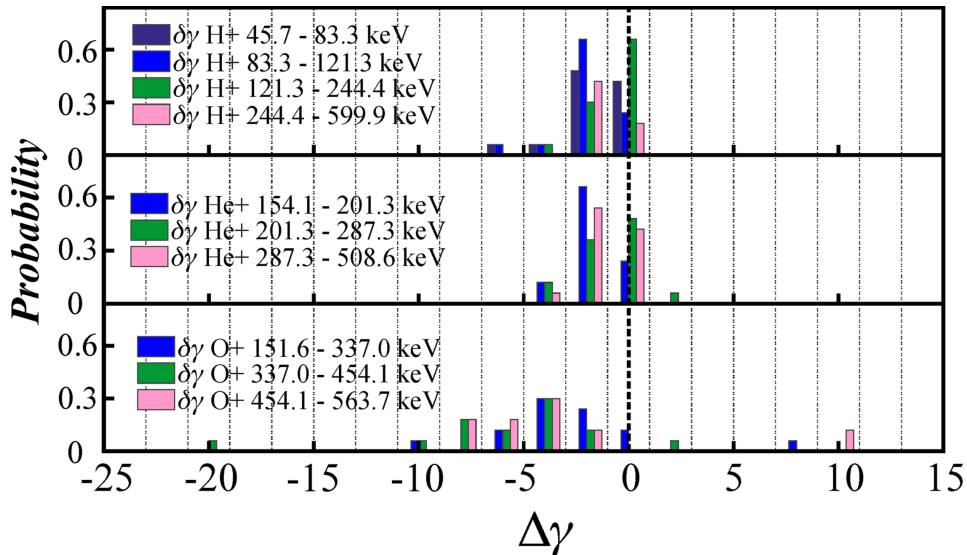


Рис. 3 — Распределение вероятности наблюдения данных значений вариации $\delta\gamma$ для ионов H^+ , He^+ и O^+ . Для каждого ионного компонента диапазоны энергий, используемые для вычисления $\delta\gamma$, обозначены цветами согласно легенде, показанной на соответствующей панели.

В четвёртой главе выполнен анализ динамики потоков и спектров энергичных электронов (с энергиями более 40 кэВ) на основе наблюдений 13 событий диполизации магнитного поля спутниками *Cluster* в ближнем хвосте магнитосферы Земли. Было показано, что во всех событиях возрастания потоков энергичных электронов происходили одновременно с началом диполизаций, а кратковременные усиления потоков энергичных электронов (инъекции) наблюдались в окрестности импульсов B_Z -компоненты магнитного поля на фазе роста диполизации. Вместе с этим имеет место хорошая корреляция ($КК > 0.6$) между динамикой потока энергичных электронов с энергиями до 90 кэВ и B_Z - компонентой магнитного поля (см. Рис. 4). Для более высоких энергий данная корреляция оказалась слабее ($КК < 0.6$). Анализ, основанный на квазиadiaбатической теории, показал, что бетатронный механизм играет существенную роль в ускорении электронов

в диапазоне энергий до ~ 90 кэВ. При этом динамика потоков электронов более высоких энергий плохо описывается бетатронным сценарием и требует учёта других, возможно, неадиабатических механизмов.

Пятая глава посвящена исследованию процессов взаимодействия квази-параллельных свистовых волн, наблюдаемых во время 48 продолжительных диполизаций, с электронной популяцией в диапазоне энергий от 0.6 до 30 кэВ по измерениям трёхмерных функций распределения электронов по скоростям комплекса инструментов FPI [7] миссии MMS с высоким временным разрешением (30 мс). До запуска миссии MMS исследование динамики функции распределения электронов на временных масштабах волнового всплеска (\sim нескольких секунд) было невозможным из-за недостаточного временного разрешения плазменных спектрометров. В данной главе впервые, используя наблюдения MMS, были определены питч-угловые и энергетические характеристики резонансных электронов, исследована динамика анизотропии функции распределения электронов и её связь с наблюдаемыми всплесками свистовых волн в течение ~ 13 мин после начала продолжительных диполизаций, когда были доступны наблюдения MMS в быстрой моде измерений. Наблюдения функции распределения электронов по скоростям с высоким временным разрешением позволили рассчитать инкремент (декремент) γ свистовых волн на масштабах длительности волновых всплесков. Показано, что в большинстве событий из собранной базы данных электроны с энергиями $W_{res} \geq 10$ кэВ и питч-углами $\alpha_{res} \sim 100^\circ - 130^\circ$ и $\alpha_{res} \sim 50^\circ - 80^\circ$ вносят максимальный положительный вклад в инкремент этих волн (см. Рис. 5). Большие значения W_{res} были обусловлены низкими относительными частотами ($\frac{f_w}{f_{ce}}$) наблюдаемых свистовых волн $f_w \leq 0.2f_{ce}$, где f_w - частота наблюдаемого волнового всплеска, а f_{ce} - электронная горочастота. Было показано, что в процессе взаимодействия волны с электронами перпендикулярная анизотропия низкоэнергичной части функции распределения скоростей может уменьшаться, а более высокоэнергичная часть функции распределения может увеличивать свою перпендикулярную анизотропию. Этот эффект объясняет наблюдения энергозависимой анизотропии потоков электронов. Увеличение перпендикулярной анизотропии функции распределения электронов по скоростям в области высоких энергий, близкой или даже превышающей верхний

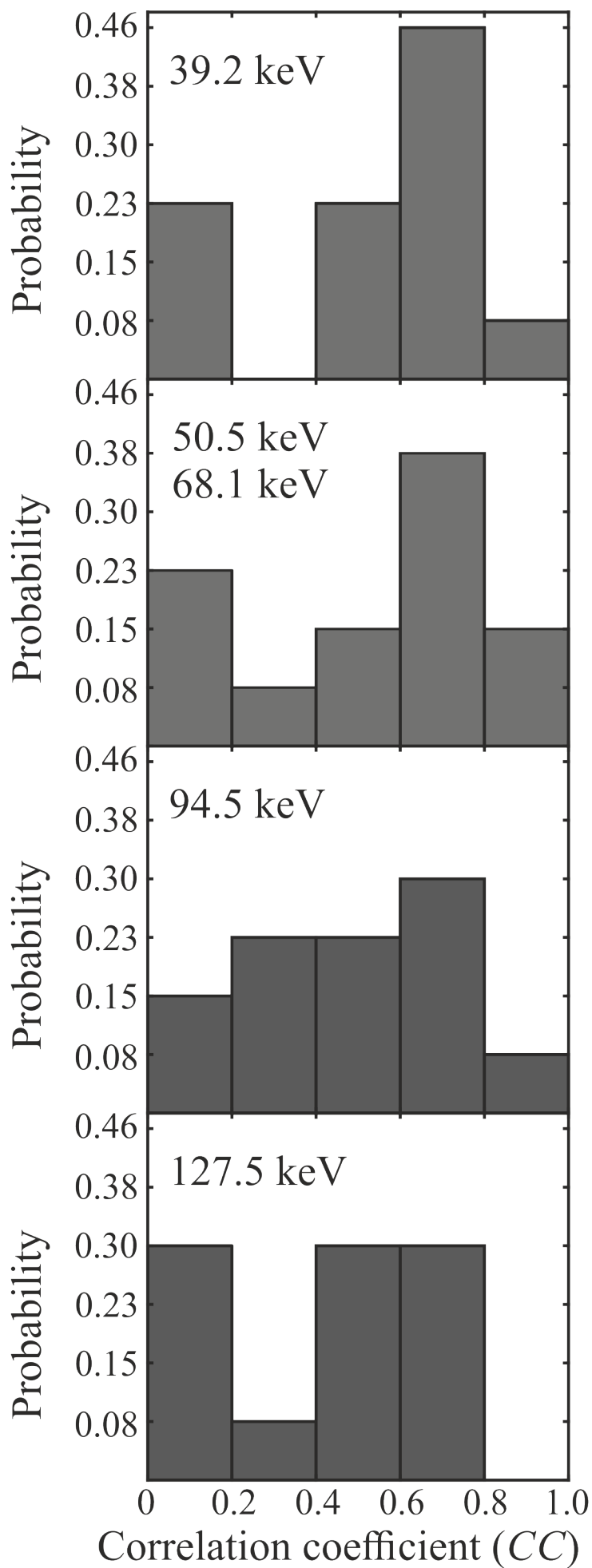


Рис. 4 — Гистограммы распределения вероятности наблюдения данной величины коэффициента корреляции между потоками электронов данных энергий и величиной B_Z -компоненты магнитного поля во время диполизаций. Распределения вероятностей для электронов с энергиями 50.5 кэВ и 68.1 кэВ идентичны и представлены на одном графике.

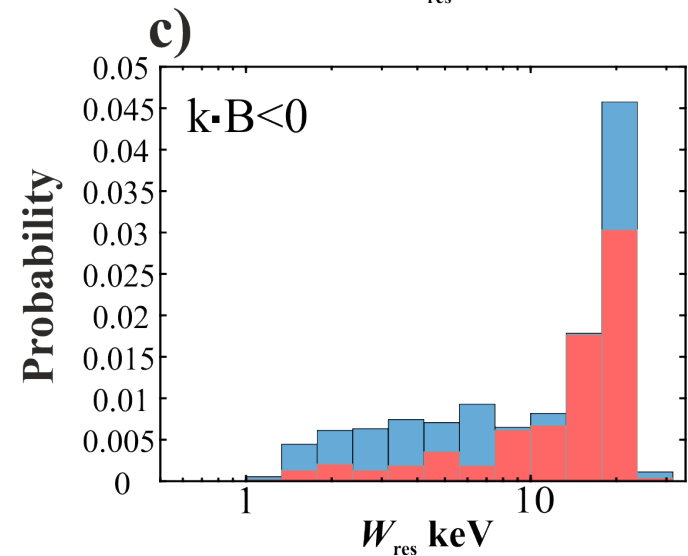
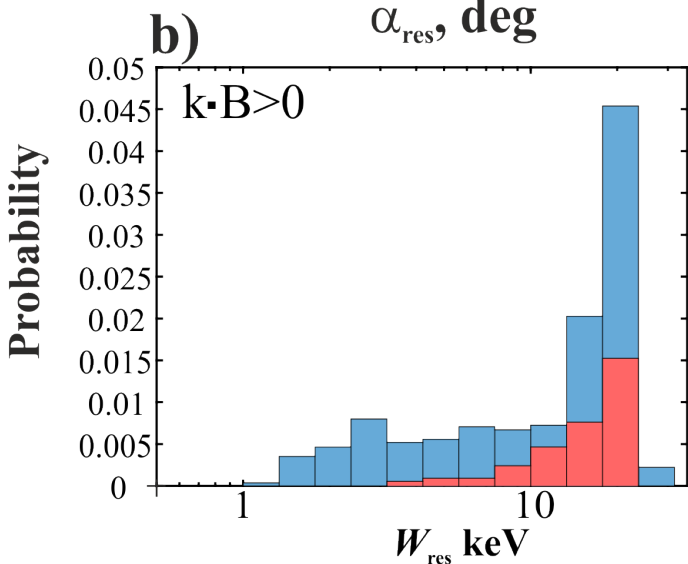
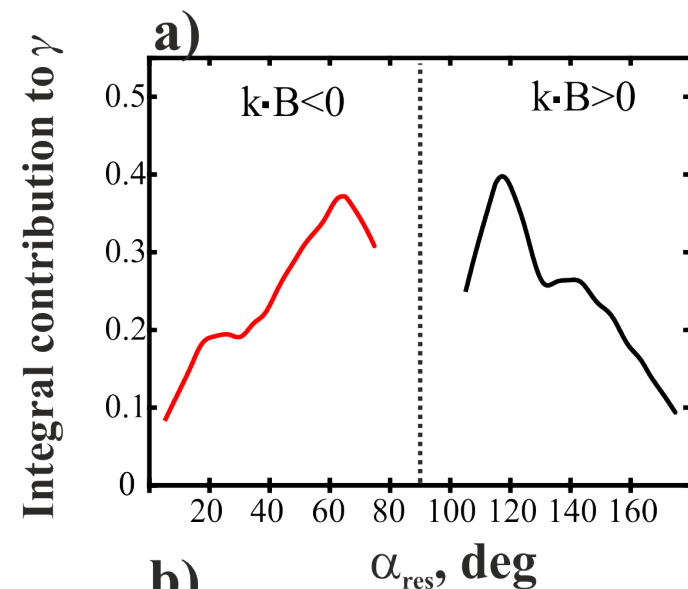


Рис. 5 — Сверху вниз: (а) медианные профили нормированных значений положительного вклада резонансных электронов для максимального значения γ в зависимости от pitch-углов электронов (α_{res}) для волн, распространяющихся параллельно (черный профиль) и антипараллельно B (красный профиль); (б) статистические распределения W_{res} электронов, дающих максимальный вклад в γ для волн с $k \cdot B > 0$; и (с) $k \cdot B < 0$; Голубым цветом показаны гистограммы, описывающие распределение W_{res} , рассчитанное для моментов, когда выполнялось условие близости частоты наблюдаемой волны к частоте, на которой наблюдался максимальный инкремент γ . Красные гистограммы отображают распределения W_{res} резонансных электронов, которые потенциально могут быть рассеяны в конус потерь наблюдаемыми свистовыми волнами.

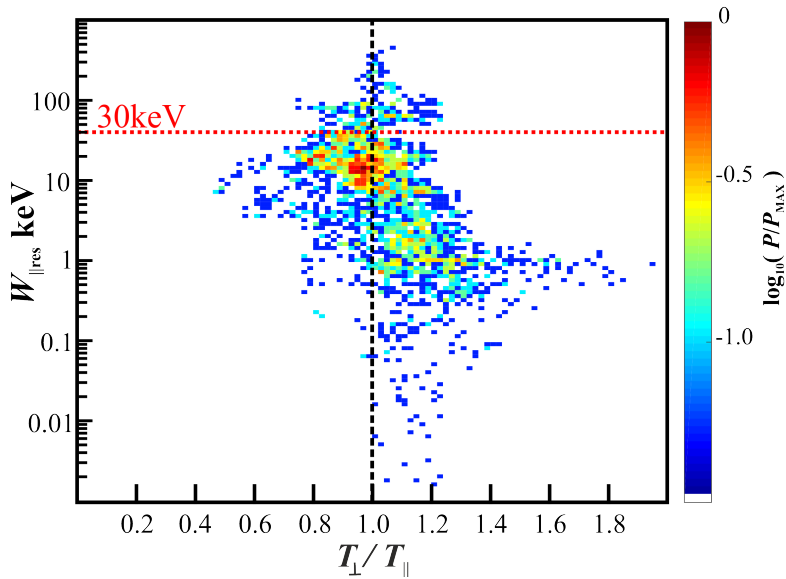


Рис. 6 — Распределение вероятности (P/P_{MAX}) наблюдения в каждый момент времени каждого всплеска свистовых волн данных значений W_{res} и T_{\perp}/T_{\parallel} . Горизонтальная красная пунктирная линия отображает верхний энергетический порог прибора FPI.

порог энергий инструмента FPI, и одновременное уменьшение перпендикулярной анизотропии в области более низких энергий могут приводить к значениям температурной анизотропии $T_{\perp}/T_{\parallel} < 1.0$ во время наблюдения свистовых волн. Таким образом, было показано, что большие значения W_{res} объясняют неожиданные значения температурной анизотропии $T_{\perp}/T_{\parallel} < 1.0$, наблюдаемые во время многих всплесков квази-параллельных свистовых волн из используемой базы данных (см. Рис. 6). Из-за близости энергий резонансных электронов к верхнему порогу энергий FPI соответствующие значения T_{\perp}/T_{\parallel} неправильно отображают реальную анизотропию электронной функции распределения по скоростям, ответственную за генерацию свистовых волн. Поэтому в данной работе сделан вывод, что свистовые волны, наблюдаемые в те периоды, когда $T_{\perp}/T_{\parallel} < 1.0$, также были генерированы за счёт локальной циклотронной неустойчивости, как и свистовые волны, наблюдаемые в периоды с $T_{\perp}/T_{\parallel} > 1.0$.

В данной главе также показано, что низкочастотные квази-параллельные свистовые волны могут рассеивать электроны в конус потерь. В большинстве событий из используемой базы данных резонансные электроны, которые потенциально могут быть рассеяны в конус потерь во время начальной фазы диполизации, имеют энергии $\sim 10 - 20$ кэВ.

Выявлено, что во время продолжительных диполизаций свистовые волны играют важную роль в динамике функции распределения электронов по скоростям, наблюдаемой в диапазоне энергий более 2 кэВ (см. Рис. 7).

В этом диапазоне энергий резонансные электроны более низких энергий передают энергию волнам, которые, в свою очередь, передают свою энергию резонансным электронам более высоких энергий. Таким образом, будучи возбужденными из-за циклотронной неустойчивости, вызванной температурной анизотропией сверхтепловых электронов, свистовые волны играют важную роль в обмене энергией между различными частями энергетического спектра в сверхтепловом диапазоне энергий электронов. Это может привести к трансформации высокоэнергичной части функции распределения электронов от максвелловской к степенной форме. Данный вывод согласуется с предыдущими наблюдениями степенного спектра высокоэнергичной популяции электронов, наблюдаемого одновременно со свистовыми волнами во время диполизации (например, [8]).

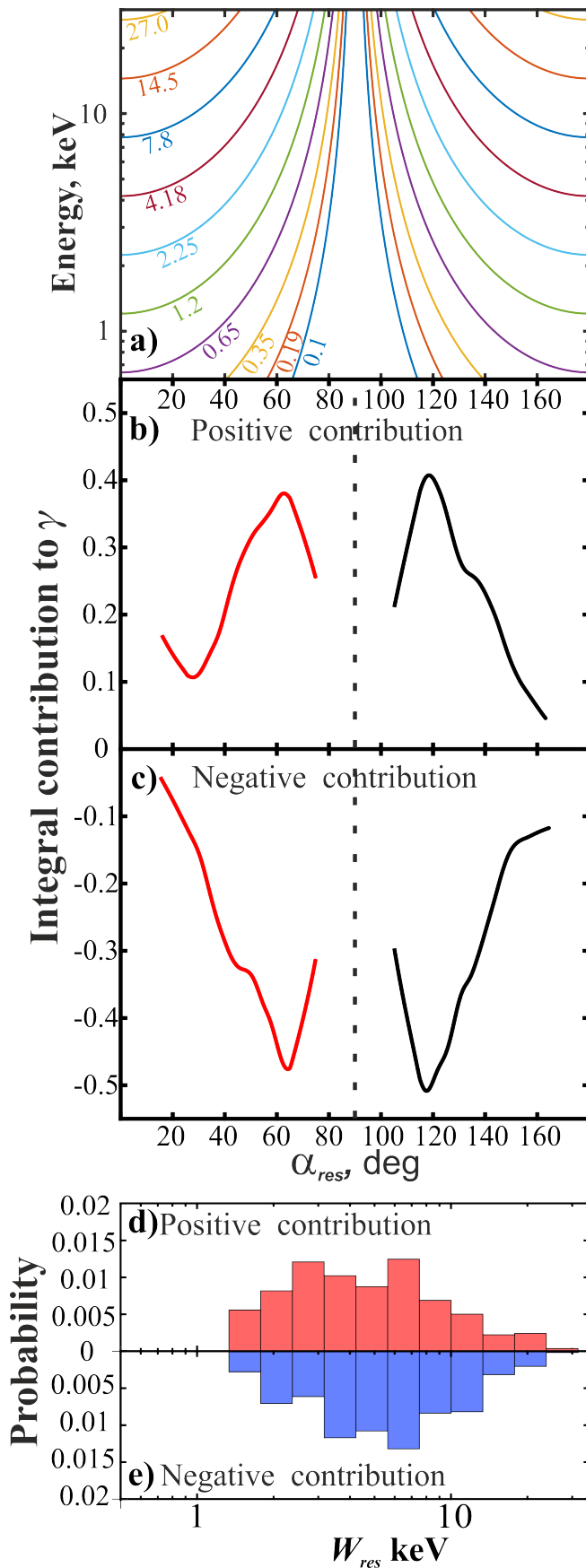


Рис. 7 — Сверху вниз: (а) кривые $W_{res}(\alpha_{res})$, рассчитанные для заданного $W_{\parallel res}$, значение которого в кэВ отображается рядом с соответствующей кривой; (б) медианные профили нормированных значений положительного и (с) отрицательного вкладов резонансных электронов в максимальное значение γ в зависимости от питч-углов электронов (α_{res}). Профили, полученные для волн, распространяющихся параллельно и антипараллельно В, показаны черными и красными линиями соответственно. Панели (d) и (e) показывают распределения W_{res} электронов, вносящих максимальный положительный и отрицательный вклады в γ соответственно.

В заключении представлены следующие основные результаты диссертации:

- В развитии продолжительных диполизаций можно выделить три временных масштаба: I) продолжительный рост B_Z - компоненты магнитного поля длительностью до 20 мин; II) импульсные возрастания B_Z - компоненты продолжительностью ≤ 1 мин, наблюдаемые во время плавного роста диполизации; и (III) сильные и быстрые вариации градиентов магнитного поля (≤ 2 с) на фронтах импульсов B_Z .
- Существуют два различных пространственных масштаба ДФ: $\leq 1\rho_i$ (ρ_i - гиррорадиус тепловых протонов) для головных ДФ (связанных с началом диполизации) и $\geq 3\rho_i$ для ДФ, наблюдаемых в зоне накопления магнитного потока. Данные различия могут быть связаны с расширением/распадом ДФ в зоне накопления потока.
- Установлено наличие сильных вариаций градиентов магнитного поля и тонких ($\leq 0.4\rho_i$) интенсивных (от 10 до $60 \frac{nA}{M^2}$) токовых структур, связанных с ДФ и наблюдаемых на фазе продолжительного роста диполизации. Ток в таких структурах переносится преимущественно электронами. Показано, что имеет место хорошее соответствие между наблюдениями этих структур и уменьшением AL индекса.
- Показано, что во время диполизаций в ближнем хвосте магнитосферы Земли наблюдается возрастание потоков ионов разных масс в следующих диапазонах энергий: $\sim 83 - 600$ кэВ для H^+ , $\sim 287 - 1100$ кэВ для He^+ и $\sim 560 - 1160$ кэВ для ионов O^+ . Эти возрастания начинались примерно за 1 мин до начала диполизации и продолжались $\gtrsim 1$ мин после начала.
- Наибольшая амплитуда отрицательных вариаций показателя степенного энергетического спектра γ обнаружена для тяжелых ионов (O^+), что показывает более эффективное ускорение тяжелых ионов, чем легких (H^+ , He^+). Также сильные отрицательные вариации γ наблюдались в ограниченных диапазонах энергий для всех ионных компонент. Это указывает на возможность неадиабатического резо-

- нансного ускорения ионов при их взаимодействии с множественными ДФ во время диполизаций.
- Наблюдалась хорошая корреляция ($KK > 0.6$) между динамикой потока энергичных электронов с энергиями до 90 кэВ и B_Z – компонентой магнитного поля во время диполизаций. Для более высоких энергий, данная корреляция оказалась слабее ($KK < 0.6$). Показано, что бетатронный механизм играет существенную роль в ускорении электронов в диапазоне энергий до ~ 90 кэВ во время диполизаций.
 - По данным миссии MMS определены характеристики резонансных электронов, взаимодействующих с квази-параллельными свистовыми волнами во время продолжительных диполизаций. Установлено, что в большинстве событий электроны с энергиями $W_{res} \geq 10$ кэВ и питч-углами $\alpha_{res} \sim 100^\circ - 130^\circ$ и $\alpha_{res} \sim 50^\circ - 80^\circ$ вносят максимальный положительный вклад в инкремент свистовых волн.
 - Показано, что во время всплесков свистовых волн энергезависимая анизотропия потоков электронов формируется за счёт их взаимодействия со свистовыми волнами.
 - Установлено, что резонансные электроны, которые потенциально могут быть рассеяны в конус потерь во время начальной фазы диполизации, имеют энергии $\sim 10 - 20$ кэВ.
 - Обнаружено, что будучи возбужденными из-за циклотронной неустойчивости, вызванной температурной анизотропией сверхтепловых электронов, свистовые волны играют важную роль в обмене энергией между различными частями энергетического спектра в сверхтепловом диапазоне энергий электронов.

Благодарности

Автор выражает большую благодарность своему научному руководителю д.ф.-м.н. Григоренко Елене Евгеньевне за 9 лет совместной плодотворной работы. Благодаря ее поддержке автор приобрел уникальные профессиональные компетенции и получил значимые результаты в своей научной работе.

Также автор выражает благодарность академику Льву Матвеевичу Зелёному за ценные советы и рекомендации на протяжении всего учебного процесса.

Автор благодарит Крупко Владимира Николаевича и Леус Елену Владимировну, преподавателей планетария в ГДДЮТ г. Омска, за привитый с детства интерес к естествознанию и космической физике. Благодаря им автор ещё на ранних этапах обучения определился со своей будущей профессиональной деятельностью.

Автор выражает благодарность коллективу отдела физики плазмы ИКИ РАН и коллективу преподавателей кафедры космической физики.

Автор благодарит Панова Евгения Валентиновича за помощь в освоении ряда инструментов и методов, необходимых для получения результатов по данным миссии MMS, которые представлены в первой и последней главах данной диссертации.

Также автор выражает благодарность Шкляру Давиду Рувимовичу за лучший курс в рамках обучения, совместную работу и неоценимую помощь с исследованиями, представленными в последней главе.

Автор благодарит команды Cluster Science Archive и MMS Data Center за организацию и доступ к данным миссий *Cluster* и MMS, а также весь коллектив авторов программного пакета SPEDAS. Автор отдельно благодарит P.W. Daly и E.A. Kronberg за помощь в анализе данных инструментов RAPID миссии *Cluster* и их валидацию.

Автор выражает благодарность Петруковичу Анатолию Алексеевичу и Садовскому Андрею Михайловичу за организацию учебного и рабочего процессов, поддержку и помощь в ряде важных вопросов.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов: РНФ № 20-42-04418; РНФ № 18-47-05001; Volkswagen Foundation grant № 97742; РФФИ № 19-32-90009\19.

Список литературы

1. THEMIS observations of an earthward-propagating dipolarization front / A. Runov [et al.] // Geophysical Research Letters. — 2009. — Vol. 36, no. 14. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2009GL038980>.
2. Cluster observations of an ion-scale current sheet in the magnetotail under the presence of a guide field / R. Nakamura [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2008. — Vol. 113, A7. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2007JA012760>.
3. Recent advances in understanding substorm dynamics / V. A. Sergeev [et al.] // Geophysical Research Letters. — 2012. — Mar. — Vol. 39, issue 5. — DOI: [10.1029/2012GL050859](https://doi.org/10.1029/2012GL050859).
4. On the instability of a plasma with an anisotropic distribution of velocities in a magnetic field / R. SAGDEEV [et al.] // SOVIET PHYSICS JETP. — 1961. — June. — Vol. 12, no. 39. — P. 181–184.
5. Whistler mode waves at magnetotail dipolarization fronts / H. Viberg [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2014. — Vol. 119, no. 4. — P. 2605–2611. — DOI: <https://doi.org/10.1002/2014JA019892>.
6. Multiscale Currents Observed by MMS in the Flow Braking Region / R. Nakamura [et al.] // Journal of Geophysical Research: Space Physics. — 2018. — Vol. 123, no. 2. — P. 1260–1278. — DOI: <https://doi.org/10.1002/2017JA024686>.
7. Fast Plasma Investigation for Magnetospheric Multiscale / C. Pollock [et al.] // . — 2016. — Mar. — Vol. 199, no. 1–4. — P. 331–406. — DOI: [10.1007/s11214-016-0245-4](https://doi.org/10.1007/s11214-016-0245-4).
8. Energy Range of Electron Rolling Pin Distribution Behind Dipolarization Front / M. J. Zhao [et al.] // Geophysical Research Letters. — 2019. — Vol. 46, no. 5. — P. 2390–2398. — DOI: <https://doi.org/10.1029/2019GL082100>.