

НАПРАВЛЕНИЕ 6. Магнитосфера.

Кураторы направления: Петрукович А.А. (ИКИ РАН), Демехов А.Г. (ИПФ РАН).

6.1	Проект 6.1: Низкочастотные электромагнитные волны и структуры в околоземной плазме	ИФЗ РАН	Похотелов О.А.
6.2	Проект 6.2: Сравнительный анализ взаимодействия высокоэнергичных заряженных частиц с различными волновыми модами в радиационных поясах Земли	ИКИ РАН	Шкляр Д.Р., Могилевский М.М.
6.3	Проект 6.3: Авроральные проявления возмущений баллонного типа в плазменном слое хвоста магнитосферы	ПГИ КНЦ РАН	Головчанская И.В.
6.4	Проект 6.4: Вторжения заряженных частиц в атмосферу Земли: взаимосвязь с геомагнитной активностью и волновыми явлениями в магнитосфере. Авроральное структурирование и связанные с ним явления в магнитосферно-ионосферной плазме	ПГИ КНЦ РАН	Яхнин А.Г., Козелов Б.В.
6.5	Проект 6.5: Исследования механизмов ускорения плазмы индукционными и потенциальными электрическими полями	ИКИ РАН	Зелёный Л.М.
6.6	Проект 6.6: Комплексное исследование околопланетных плазменных границ и физических процессов, определяющих их образование	ИКИ РАН	Веригин М.И.
6.7	Проект 6.7: Коллективные процессы в плазменном магнитосферном мазере и вблизи него	ИПФ РАН	Беспалов П.А., Демехов А.Г.
6.8	Проект 6.8: Формирование крупномасштабной магнитной структуры хвоста магнитосферы Земли в части компоненты магнитного поля ВУ	ИКИ РАН	Петрукович А.А., Григоренко Е.Е., Ковражкин Р.А.

Проект 6.1. Низкочастотные электромагнитные волны и структуры в околоземной плазме.

Экспериментально обнаружены и теоретически исследованы новые типы электромагнитных структур в космической плазме и изучено их нелинейное взаимодействие.

Экспериментальные исследования

Впервые обнаружены два вида необычных ОНЧ излучений в авроральных широтах на финской obs. Соданкюля ($L \sim 5.5$) и российской obs. Ловозеро, расположенной на ~ 400 км к востоку.

Теоретические исследования

Исследована модификация магнитосферной плазмы из-за пондеромоторных сил ионно-циклотронных волн (пульсаций диапазона Pc1) вне полуденной меридиональной плоскости магнитосферы. Рассмотрено влияние пондеромоторных сил, вызванных геомагнитными пульсациями, на изменение плотности плазмы вне полуденной меридиональной плоскости магнитосферы. Показано, что эффект этих сил приводит к повышению плотности (сгущению) плазмы в областях магнитосферы вне полуденного сектора и на высоких широтах. Рассчитана зависимость возмущения нормированной массовой плотности плазмы вне полуденной меридиональной плоскости от различных параметров магнитосферы.

Исследованы нелинейные структуры бездисперсионных альвеновских волн в плазме произвольного давления.

Исследована структура скорости, магнитного и продольного электрического полей в плоскости, ортогональной внешнему магнитному полю

Понимание масштабируемой природы вихревых движений в космической плазме обеспечивает уникальное проникновение внутрь связи крупно- и мелкомасштабных структур в атмосфере Солнца.

Руководитель проекта: Похотелов Олег Александрович, дфмн, профессор, ИФЗ РАН, rokh@ifz.ru, 8-499-254-8805.

Публикации: по данному проекту в 2015 году опубликованы 8 статей и 6 трудов конференций и рабочих групп.

Проект 6.2. Сравнительный анализ взаимодействия высокоэнергичных заряженных частиц с различными волновыми модами в радиационных поясах Земли.

Тема 6.2.1. Взаимодействие энергичных протонов с квази-электростатическими свистовыми волнами большой амплитуды в магнитосфере.

В 2015 были начаты работы по анализу взаимодействия энергичных протонов кольцевого тока с квази-электростатическими свистовыми волнами большой амплитуды, о которых впервые сообщалось в работе Cattell, C., et al. (2008), Discovery of very large amplitude whistler-mode waves in Earth's radiation belts, Geophys. Res. Lett., 35, L01105, doi:10.1029/2007GL032009. По данным спутников VanAllenProbes были отобраны случаи наблюдения указанных волн большой амплитуды, и найдены соответствующие данные по потокам протонов по данным спутников POES. Был разработан механизм взаимодействия

энергичных электронов с широким спектром квази-электростатических свистовых волн большой амплитуды в неоднородной плазме и показано, что данное взаимодействие не описывается классической квазилинейной теорией. В 2016 году планируется завершить начатое исследование. В этом исследовании принимают участие Е.Е. Титова и Д.Р. Шкляр.

Тема 6.2.2. Релятивистское ускорение с поворотом при взаимодействии с монохроматическими свистовыми волнами, распространяющимися под углом к геомагнитному полю.

Одно из наиболее интересных явлений, связанных с резонансным взаимодействием свистовых волн с электронами релятивистских энергий – так называемое релятивистское ускорение с поворотом. Резонансное условие для таких электронов содержит Лоренц-фактор, благодаря чему в некоторой точке траектории продольный резонансный импульс может обратиться в нуль, что соответствует повороту захваченной частицы. При взаимодействии с волнами, распространяющимися вдоль геомагнитного поля, это явление приводит к более эффективному ускорению захваченных частиц. (Этот процесс, который правильно было бы назвать «ростом энергии частицы», традиционно называют «ускорением»). Построена теория резонансного взаимодействия вблизи точки поворота с волнами, распространяющимися под углом к геомагнитному полю. Показано, что для случая, когда источник волн находится вблизи земли (молниевые разряды, сигналы ОНЧ передатчиков) амплитуда резонансного взаимодействия «устроена» таким образом, что после поворота частицы выходят из захвата. В этом случае релятивистское ускорение с поворотом не приводит к более эффективному набору энергии захваченных частиц. Планируется провести численные расчёты для эволюции функции распределения частиц, сравнить набор энергии для различных резонансов. В этом исследовании принимают участие И.В. Кузичев и Д.Р. Шкляр.

Тема 6.2.3. Авроральное километровое излучение и его связь с процессами в магнитосфере.

В 2015 году средства для выполнения работ по проекту выделены не были. Поэтому работы проводились на инициативной основе, но в "тлеющем" режиме.

Изначально задача на 2015 год была связана с определением характеристик силовой трубки магнитного поля, опирающейся на авроральную ионосферу. Во второй половине прошлого века сложилось мнение, что авроральная ионосфера представляет собой "экран", на который проецируются события в хвосте магнитосферы. Однако прямые

измерения параметров плазмы и электромагнитных полей в авроральной области показали, что это не так, и что процессы в силовой трубке весьма активны. Большую роль в понимании процессов на высоких широтах сыграли одновременные измерения на двух парах спутников проекта ИНТЕРБОЛ. По результатам измерений в хвосте магнитосферы было показано (Milovanovetal., 2001), что фрактальная геометрия перколяции токовых систем имеет фрактальный размер $d \sim 1,66$ и индекс связности $i \sim 0,5$. В E-слое авроральной ионосферы (A.Chernyshovatal.) $d \sim 1,38$ и $i \sim 0,09$. Мы использовали свойства АКР для определения изменений свойств плазмы в силовой трубке магнитного поля в авроральной области. Были отобраны интервалы, в которые наблюдалось стационарное АКР в течение нескольких десятков минут (стационарное АКР).

Чтобы проследить эволюцию свойств плазмы в зависимости от высоты, мы исследовали спектр флуктуаций АКР на различных частотах, что соответствует высотному разрезу.

Большая изменчивость спектров указывает на необходимость применения статистических методов обработки. Это будет возможно после аналогичной обработки большого массива данных. Эта работа планируется на 2016 год.

Руководители проекта: Шкляр Д.Р., Могилевский М.М.

Проект 6.3. Авроральные проявления возмущений баллонного типа в плазменном слое хвоста магнитосферы.

С использованием сопряженных оптических и спутниковых наблюдений рассмотрены E-W события перехода к взрывной фазе суббури [Mendetal., 2011].

Показано, что сопряженные низкочастотные возмущения в плазменном слое хвоста магнитосферы при этом обнаруживают flapping и, следовательно, казалось бы, отражают полоидальные структуры, генерируемые баллонной неустойчивостью .

Экспериментально установлено, что возмущения являются преимущественно тороидальными, что соответствует сопряженным авроральным наблюдениям, и хорошо согласуются с транзиентными тороидальными волнами [Takahashietal.,1996]. Эти волны могут наблюдаться в течение нескольких десятков минут и являются преимущественно (но не в точности) тороидальными. Этот факт делает актуальным поиск механизмов преимущественно тороидальных возмущений в плазменном слое хвоста магнитосферы перед переходом к взрывной фазе суббури в E-W событиях.

Одним из возможных механизмов, рассмотренным в [Golovhsanskaya et al., 2015], являются распространяющиеся баллонные волны, фронты которых наклонены под малыми углами к E-W направлению. Авторами показано, что дисперсионное уравнение

баллонных волн приближённо выполняется для наблюдаемых частот, поперечных длин волн и ориентации фронтов возмущений, а также при разумных предположениях относительно продольной длины волны.

Руководитель проекта: Головчанская И.В. ПГИ КНЦ РАН.

Публикации с благодарностью Программе №9: по данному проекту в 2015 году опубликованы 2 статьи.

Проект 6.4. Вторжения заряженных частиц в атмосферу Земли: взаимосвязь с геомагнитной активностью и волновыми явлениями в магнитосфере. Авроральное структурирование и связанные с ним явления в магнитосферно-ионосферной плазме
Тема 6.4.1. Планетарная картина ионных высыпаний.

По данным спутников DMSPF6 и F7 исследованы характеристики ионных высыпаний во всех секторах местного геомагнитного времени (MLT). На основе полученных в процессе исследования результатов создана модели ионных высыпаний, которая при заданном уровне магнитной активности получить планетарное распределение характеристик высыпающихся ионов. Проведено исследование сравнительных характеристик ионных и электронных высыпаний в различных секторах MLT. Модель ионных высыпаний использована для расчета давления плазмы на высотах ионосферы. С использованием модели ионных высыпаний и созданной нами ранее модели электронных высыпаний рассчитано планетарное распределение интегральной проводимостей ионосферы в зависимости от уровня магнитной активности.

Публикация: по данной теме в 2015 году была опубликована 1 статья.

Тема 6.4.2. Организация наблюдений полярных сияний в Апатитах.

Организованы наблюдения полярных сияний на полигоне в Апатитах, налажен сбор и обработка данных. На основе наблюдений в течение двух зимних сезонов показано, что динамика полярных сияний во время суббурь (направление движения форм сияний с юга на север и наоборот) зависит от условий в солнечном ветре.

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Проект 6.5. Исследования механизмов ускорения плазмы индукционными и потенциальными электрическими полями.

Тема 6.5.1. Установлено, что токовые слои (ТС) с шировой компонентной магнитного поля могут формироваться в результате самосогласованной эволюции тонкого токового слоя при наличии некоторого начального возмущения в центре ТС.

Самосогласованное кинетическое моделирование тонких ТС в хвосте магнитосферы Земли показало, что при наличии небольшого возмущения шировой компоненты магнитного поля в центре слоя, ТС может эволюционировать к устойчивой токовой конфигурации с магнитным широм. Найдено два устойчивых состояния ТС, характеризующихся симметричным и антисимметричным пространственным распределением (в направлении нормали к ТС) шировой компоненты магнитного поля. Показано, что формирование таких токовых конфигураций происходит одновременно с усилением продольного тока в центре ТС, возникающего в результате асимметрии "север-юг" в отражении/преломлении квазиadiaбатических ионов при их взаимодействии с ТС. Также показано, что формирование равновесной токовой конфигурации с симметричным пространственным распределением шировой компоненты магнитного поля более вероятно при малых значениях нормальной компоненты магнитного поля.

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Тема 6.5.2. Установлено существование очень тонких токовых слоев (с толщиной меньше протонного гирорадиуса) вблизи области магнитного пересоединения.

Описаны их свойства и предложен механизм формирования.

Многоспутниковые наблюдения Cluster в хвосте магнитосферы Земли позволили установить существование протяженных (радиальный размер много больше толщина слоя) ТС с толщиной меньше протонного гирорадиуса. Показано, что ток в таких слоях переносится электронами. Важным фактором в формировании таких слоев является анизотропия электронной температуры, возникающая за счет генерации в процессе магнитного пересоединения продольных (распространяющихся вдоль магнитного поля) электронных пучков.

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Руководитель проекта: академик Зеленый Лев Матвеевич, Институт космических исследований РАН, lzelenyi@iki.rssi.ru

Проект 6.6. Комплексное исследование околопланетных плазменных границ и физических процессов, определяющих их образование.

Тема 6.6.1. Начат анализ влияния параметров межпланетного магнитного поля на положение и форму магнитопаузы. С использованием результатов 3D МГД моделирования обтекания магнитопаузы солнечным ветром и аналитического решения МГД уравнений в Лагранжевых переменных построены аналитические выражения, описывающее полное P , тепловое P_{th} и магнитное P_{mag} давления набегающего потока плазмы в точке его остановки:

С использованием решения уравнения Лапласа в эллипсоидальных координатах получено простое аппроксимирующее выражение для “фактора удвоения” f_d магнитного поля в подсолнечной точке геомагнитопаузы в зависимости от ее формы. Качественно объяснено “быстрое” приближение к Земле и “затупление” магнитопаузы при росте южной компоненты ММП, и “медленное” перемещение магнитопаузы от Земли и “сужение” этой границы при росте северной компоненты ММП.

Руководитель темы: д.ф.-м.н., М.И. Веригин, verigin@iki.rssi.ru

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Тема 6.6.2. Проведены работы по анализу суточных f -графиков Якутской меридиональной цепочки ионозондов (Якутск – Жиганск– Батагай– Тикси) с резкими падениями (срывами) критической частоты ($foF2$) регулярного F2-слоя ионосферы. С помощью расчетов, выполненных по прогностической модели высокоширотной ионосферы, показано, что положение срывов критической частоты совпадает с экваториальной границей крупномасштабной конвекции плазмы в вечернем секторе местного магнитного времени. Проанализированы данные за 1968 – 1983 гг. и приведена статистика наблюдений срывов $foF2$, показывающая, что они регистрируются, в основном, в равноденственные месяцы и в послеполуденные и вечерние часы при умеренно-возмущенных геомагнитных условиях.

Руководитель темы: В.Л. Халипов, khalipov@iki.rssi.ru

Публикация: по данной теме в 2015 году подготовлена для публикации 1 статья.

Тема 6.6.3. Разработан первый вариант основанной на физических принципах полуэмпирической трехмерной модели плотности протонов, позволяющей восстановить распределение плазмы во всей плазмосфере Земли для спокойных геомагнитных условий по измерениям заряженных частиц вдоль одной орбиты спутника. Модель основана на экспериментальных данных прибора АЛЬФА-3, работавшего на космическом аппарате *ИНТЕРБОЛ-1*, и теоретических выражениях, описывающих распределение плазмы в

плазмосфере для случаев теплового равновесия и бесстолкновительного начального частичного заполнения плазмосферных оболочек.

Руководитель темы: к.ф.-м.н. Котова Г.А., kotova@iki.rssi.ru

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Тема 6.6.4. По данным доплеровских измерений на Якутской меридиональной сети субавроральных ионосферных станций DPS-4 начаты исследования вертикальных дрейфов плазмы во время регистрации поляризационного джета (ПД) в слое F2 ионосферы. Показано, что в периоды наблюдения ПД скорости вертикальных дрейфов значительно выше, чем фоновые движения и достигают 50-150 м/сек. На полярной границе ионосферного провала происходит изменение направления движения ионосферной плазмы с восходящего на нисходящее. Рассмотрены вариации вертикальных дрейфов на различных фазах суббуревого возмущения. Эти измерения хорошо согласуются с синхронными измерениями дрейфов на спутниках DMSP.

Руководитель темы: В.Л. Халипов, khalipov@iki.rssi.ru

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 2 статьи и 4 доклада.

Проект 6.7. Коллективные процессы в плазменном магнитосферном мазере и вблизи него

Тема 6.7.1. Отмечено, что искусственные геомагнитные пульсации от связанной с экваториальной токовой струей нелинейной антенны могут эффективнее высокоширотных стенов влиять на режимы работы плазменного магнитосферного мазера в дневной субавроральной магнитосфере.

Рассмотрена возможность использования экваториальной токовой струи в низкоширотной полуденной ионосфере и связанного с ней ионосферного контура в качестве огромной нелинейной антенны, запитываемой амплитудно-модулированным излучением наземного коротковолнового нагревного стенда. Геомагнитные пульсации от нелинейной антенны могут эффективнее высокоширотных стенов влиять на режимы работы плазменного магнитосферного мазера в дневной субавроральной магнитосфере, обеспечивая резонансную модификацию спектров естественных электромагнитных излучений ОНЧ диапазона.

Публикации: по данной теме в 2015 году опубликованы 2 статьи.

Тема 6.7.2.Продемонстрировано согласие свойств квазипериодических ОНЧ излучений, полученных при статистической обработке данных спутника DEMETER и по результатам самосогласованного моделирования

Проведено сопоставление наблюдательных данных о параметрах квазипериодических (QP) КНЧ/ОНЧ излучений, зарегистрированных на борту низкоорбитального спутника DEMETER, с результатами теоретического анализа. Для статистической обработки использованы данные за шесть лет.

Проведено численное моделирование QP излучений на основе теоретической модели проточного циклотронного мазера. Результаты расчетов согласуются с основными тенденциями зависимостей параметров QP излучений, полученными из статистического анализа экспериментальных данных. На основе сопоставления теоретических и экспериментальных указаны типичные диапазоны параметров источника QP излучений, наблюдаемых на спутнике DEMETER.

Руководители темы: профессор Беспалов Петр Алексеевич, ИПФ РАН, [peter@appl.sci-
nnov.ru](mailto:peter@appl.sci-nnov.ru), д.ф.-м.н. Демехов Андрей Геннадьевич, ИПФ РАН, [andrei@appl.sci-
nnov.ru](mailto:andrei@appl.sci-
nnov.ru)

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликован 1 тезисный доклад.

Статья готовится к публикации.

Проект 6.8. Формирование крупномасштабной магнитной структуры хвоста магнитосферы Земли в части компоненты магнитного поля B_y

Тема 6.8.1. Установлен механизм формирования асимметричных пространственных распределений плотности тока в токовом слое (ТС) геомагнитного хвоста при наличии шировой компоненты магнитного поля.

На основе статистического анализа 17 интервалов пересечений ТС хвоста магнитосферы Земли спутниковым квартетом Cluster в которых наблюдался "колоколообразный" пространственный профиль шировой компоненты магнитного поля (максимальный шир наблюдался в нейтральной плоскости ТС) установлен механизм формирования асимметричных пространственных распределений плотности тока за счет асимметрии север-юг в отражении/преломлении траекторий неадиабатических ионов при их взаимодействии с ТС. Данный механизм подтвержден также кинетическим анализом траекторий тестовых ионов в магнитных конфигурациях ТС аналогичных наблюдаемым. Следующим этапом данной работы будет исследование пространственных профилей плотности тока в слоях с замкнутыми магнитными конфигурациями типа плазмоедов, а также в слоях с пространственным распределением магнитного шира типа "ступенька".

Руководитель темы: д.ф.-м.н., внс Григоренко Елена Евгеньевна, Институт космических исследований РАН, elenagrigenko2003@yandex.ru

Публикация: по данной теме в 2015 году опубликована 1 статья.

Тема 6.8.2. На основе имеющихся данных проекта Geotail сформирована база данных измерений компоненты V_y в моменты пересечений нейтрального слоя. К выборке добавлены данные по солнечному ветру. Эта база является дополнительной к ранее сформированной по тому же проекту, так как основана на другой критерии. Более ранняя база сформирована не по мгновенным пересечениям нейтрального слоя, а по усреднению в плазменном слое. Оба эти подхода ранее использовались и, как показано в данной работе, приводят к немного различным результатам по регрессии V_y в зависимости от ММП. Набор по нейтральному слою дает предпочтение измерениям при южном ММП (высокой геомагнитной активности, приводящей к частым пересечениям «нуля» в V_x), а набор по плазменному слою – измерениям при северном ММП (толстый спокойный слой). В целом такое различие свидетельствует о важности формальных статистических критериев при построении эмпирических моделей (в данном случае – критерия статистической независимости используемых данных).

Руководитель темы: чл.-корр. РАН, зав.отд. Петрукович Анатолий Алексеевич., Институт космических исследований РАН, apetruko@iki.rssi.ru