Российская Академия Наук

ИКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН

ШЕСТНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

8–12 февраля 2021
plasma2021.cosmos.ru

ОГЛАВЛЕНИЕ

Распределение секций по реальным помещениям и виртуальному пространству…….2

Чтобы помнили……..3

Теория и наблюдения Солнца…….8

Солнечный ветер и гелиосфера…….86

Магнитосфера……...118

Ионосфера……..…162

Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли……..211

Волновые явления в космической плазме…….229

Прогноз космической погоды и прикладные вопросы физики магнитосферы и ионосферы..261

Теория космической плазмы……..294

Теория и наблюдения токовых слоев…….304

Турбулентность и хаос……..……316

Распределение секций по реальным помещениям и виртуальному пространству

День недели/время		**Конференц-Зал (Zoom 1)**	**Комната 200 (Zoom 2)**	**Комната 202 (Zoom 3)**	**ГАИШ МГУ**
Понедельник 08.02.2021	Утро (09:00-12:00)	Теория и наблюдения Солнца		Ионосфера	
	Пленарный час (12:00-13:00)	**Открытие конференции**			
		Доклады: мемориальный «ИЗМИРАН», хайлайт «Солнце»			
	Вечер (14:00-17:00)	Теория и наблюдения Солнца		Ионосфера	
	(17:00-18:00)	Постерная сессия		Постерная сессия	
Вторник 09.02.2021	утро(09:30-12:30)	Магнитосфера		Теория и наблюдения Солнца	Магнитные поля ГАИШ
	Пленарный час (12:30-13:30)	Мемориальные доклады о Панасюке и Веригине			
	Вечер(14:00-17:00)	Магнитосфера	Теория космической плазмы	Теория и наблюдения Солнца	Магнитные поля ГАИШ
	(17:00-18:00)	Постерная сессия	Постерная сессия	Постерная сессия	
Среда 10.02.2021	Утро (09:30-12:30)	Солнечный ветер и гелиосфера		Ионосфера	Солнце ГАИШ
	Пленарный час (12:30-13:30)	Доклады: хайлайт «Solar Orbiter», мемориальный о Веселовском Хайлайт «Ионосфера»			
	Вечер (14:00-17:00)	Солнечный ветер и гелиосфера	Атмосфера	Волновые явления	Солнце ГАИШ
	(17:00-18:00)	Постерная сессия	Постерная сессия		
Четверг 11.02.2021	Утро (09:30-12:30)	Космическая погода		Волновые явления	
	Пленарный час (12:30-13:30)	Хайлайт «Космическая погода», мемориальный о Бережко, Хайлайт «Волновые явления»			
	Вечер (14:00-17:00)	Космическая погода		Волновые явления	
	(17:00-18:00)	Постерная сессия		Постерная сессия	
Пятница 12.02.2021	Утро (09:30-12:30)	Токовые слои			
		Постерная сессия			
	День (13:00-16:15)	Турбулентность и хаос			
	(16:15-16:30)	**Закрытие конференции**			

ПАМЯТИ УШЕДШИХ КОЛЛЕГ. ВКЛАД В ФИЗИКУ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ: ОТ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА К ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ.

Кузнецов В.Д.

ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия, kvd@izmiran.ru

В докладе, посвященном памяти сотрудников ИЗМИРАН В.В.Белого, Ю.Д.Жугжды, Ю.Я.Ружина, Ю.М.Михайлова, С.П.Гайдаш, ушедших в 2020-2021 гг., рассказывается об их вкладе в исследования по физике плазмы Солнечной системы.

Д.ф.-м.н. Вячеслав Владимирович Белый, лауреат Государственной премии Российской Федерации, внес большой вклад в исследования нестационарных явлений в ионосфере радиофизическими методами, в кинетическую теорию квантовых явлений в плазме. В последние годы его научные интересы были связаны с обобщением флуктуационно-диссипативной теоремы на случай неоднородной плазмы, с развитием метода томсоновского рассеяния, являющегося одним из основных методов диагностики плазмы.

Д.ф.-м.н. Юзеф Данилович Жугжда, лауреат Государственной премии СССР, внес большой вклад в теоретические и экспериментальные исследования плазменных процессов на Солнце. Им выполнены теоретические работы по колебательной конвекции, по колебаниям в солнечных пятнах, МГД волнам в магнитных трубках и в солнечной атмосфере и др. Он внес существенный вклад в составление научной программы космических солнечных проектов серии КОРОНАС (КОРОНАС-И, КОРОНАС-Ф, КОРОНАС-ФОТОН), в подготовку и реализацию на этих спутниках экспериментов по изучению глобальных колебаний Солнца (эксперименты ДИФОС-И, ДИФОС-Ф, СОКОЛ).

Д.ф.-м.н. Юрий Яковлевич Ружин, лауреат Государственной премии Российской Федерации, внес большой вклад в изучение плазменных и электромагнитных процессов в околоземном космическом пространстве, в магнитосфере и ионосфере Земли методом активных экспериментов и радиотомографии. С его участием осуществлен целый ряд космических проектов в рамках отечественных и международных программ («Omega», «Зарница 1,2», АРАКС, «Сполох», PORCUPINE, CRRES, АПЭКС и др.), серия экспериментов на МКС.

Д.ф.-м.н. Юрий Михайлович Михайлов, внес большой вклад в исследование низкочастотных волновых процессов в околоземном космическом пространстве и межпланетной среде. Под его руководством была разработана аппаратура для регистрации низкочастотных процессов в космической плазме (АНЧ-2МЕ), которая в течение многих лет успешно функционировала на спутниках «Интеркосмос–18, 19, 24, 25», «Ореол-3», «Космос-1809»,. был активным участником проекта «ВЕГА», занимался исследованиями сейсмоэлектромагнитных явлений с использованием спутниковых и наземных данных, подготовкой научной аппаратуры для спутников проекта «Ионосфера».

К.ф.-м.н. Сергей Петрович Гайдаш, руководитель Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН, внес большой вклад в создание Центра, разработку методик прогнозирования космической погоды, в обеспечение бесперебойной работы Центра и снабжение прогнозами организаций Роскосмоса, МЧС и других ведомств. Активно взаимодействовал со средствами массовой информации по вопросам космической погоды.

Михаил Игоревич Панасюк – путь в науке

Калегаев В.В.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Профессор Михаил Игоревич Панасюк, директор Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ, посвятил научным исследованиям более 50 лет своей жизни. Научные интересы М.И. Панасюка связаны с астрофизикой и физикой космоса: исследованием космической радиации, магнитосфер планет и космических лучей с помощью космических и наземных экспериментов. Им получены фундаментальные научные результаты в области исследования кольцевого тока и радиационных поясов в магнитосфере Земли. М.И. Панасюк – автор уникальных экспериментов на спутниках, которые привели к открытию нового явления в околоземном пространстве – формирования радиационного пояса Земли, состоящего из частиц аномальных космических лучей. В ходе экспериментов на борту спутников "Татьяна-1" (2005), "Татьяна-2" (2009), "Вернов" (2014), “Ломоносов” (2016) были получены экспериментальные результаты по экстремальным явлениям в атмосфере Земли: транзиентным электрическим разрядам в ее верхних слоях.

МИХАИЛ ИВАНОВИЧ ВЕРИГИН И ЛАБОРАТОРИЯ К.И. ГРИНГАУЗА

Котова Г.А., Безруких В.В.
.
ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kotova@iki.rssi.ru

Год назад ушел из жизни Михаил Иванович Веригин, руководивший Лабораторией межпланетной и околопланетной плазмы с 1988 г., лабораторией, созданной и возглавляемой на протяжении нескольких десятилетий профессором К.И. Грингаузом. 18 декабря 2020 г. не стало ведущего сотрудника лаборатории энтузиаста экспериментальных исследований космической плазмы Валерия Васильевича Афонина. В 2015 г. ушел из жизни также ведущий сотрудник лаборатории, человек, обладавший уникальным талантом физика-экспериментатора, Анатолий Петрович Ремизов.

Доклад посвящен памяти выдающегося ученого и очень хорошего человека М.И.Веригина, а также памяти всех ушедших сотрудников Лаборатории.

ПАМЯТИ ИГОРЯ СТАНИСЛАВОВИЧА ВЕСЕЛОВСКОГО

Яковчук О.С.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия; olesya@dec1.sinp.msu.ru

В 2020 году ушёл из жизни ведущий специалист в области физики плазмы, главный научный сотрудник НИИЯФ МГУ, доктор физ.-мат. наук, профессор Игорь Станиславович Веселовский (17.12.1940-30.12.2020).

Его областью научных интересов были физика космической плазмы, астрофизика, теоретическая физика, ядерная физика, физика Солнца, физика гелиосферы, физика магнитосферы, физика солнечно-земных связей, биофизика.

Наиболее важные результаты относятся к теории рекомбинации электронов и ионов в частично ионизованной плазме, к кинетической теории динамических плазменных процессов в атмосфере Солнца и солнечном ветре, к теоретическому моделированию межпланетного магнитного поля и развитию методов безразмерного масштабного анализа в космической плазме.

Веселовский И. С. – автор многочисленных научных публикаций высокого уровня: 2 монографии, около 200 статей. На протяжении всей своей научной деятельности активно сотрудничал с учеными многих научных центров как в СССР и РФ, так и за рубежом: в США, Канаде, Бельгии, Франции, Германии, Финляндии.

Веселовский И.С. вёл активную преподавательскую работу в Московском университете. Читал курсы лекций в Международном центре теоретической физики в Триесте (Италия) и в Университете г. Тукуман (Аргентина). Руководил работой студентов, аспирантов, соискателей.

Веселовскому И. С. было присвоено почетное звание «Заслуженный научный сотрудник Московского университета». Был награжден медалью Федерации космонавтики России.

Память об Игоре Станиславовиче Веселовском, крупном ученом и замечательном человеке, навсегда сохранится в сердцах тех, кому выпала удача с ним работать или просто общаться.

Евгений Бережко. «Отпуск это не повод не ходить на работу»

С.А. Стародубцев

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru

Доклад посвящен жизни и работе Бережко Евгения Григорьевича (15.12.1952-28.11.2020 гг.) - о детстве, учебе в ФМШ №18 и на ФизФаке МГУ, о его пути в Якутию и становлении там настоящего ученого - директора ИКФИА СО РАН им. Ю.Г. Шафера. Бережко Е.Г. (БЕГ) является одним из самых ярких и талантливых представителей Якутской школы по космофизике, исследователем астрофизики космических лучей и физики плазмы - ученого с мировым именем. Характерной его чертой было трепетное отношение к любой работе и особое внимание к тщательной постановке физической задачи. А его слова «отпуск - это не повод не ходить на работу» уже давно стали среди его учеников и коллег афоризмом. БЕГ был интересным и разносторонним человеком, с ним можно было обсуждать самые различные вопросы от рабочих моментов до сложных жизненных ситуаций.

Как-то в начале 90-х весь теоротдел, в котором под руководством БЕГа работал автор, выполнял весьма важный хоздоговор - во внеурочное время переводил с английского строительную документацию для здания «Высшей школы музыки» в Якутии». В результате 2-х месячной работы был заработан целый PC 286 «белой сборки»! С его помощью вскоре были получены новые, оригинальные результаты по ускорению космических лучей в остатках сверхновых. Одновременно американским коллегам удалось получить решение аналогичной задачи, но с сильно упрощенными параметрами и с использованием суперкомпьютерного кластера Cray. Благодаря физически обоснованной замене переменных и оригинальному алгоритму, предложенному БЕГом, метод численного решения сложной системы уравнений оказался настолько эффективным, что теоретикам ИКФИА удалось получить сопоставимые результаты на простом и медленном компьютере. Последующий доклад БЕГа на ICRC1993 в Калгари вызвал большой резонанс и был особо отмечен в докладе рапортера на заключительном заседании конференции.

Другая сторона жизни Евгения Григорьевича это его увлечение спортом - он был в курсе всех главных новостей спортивной жизни и в стране, и за рубежом. А во время отпуска часто бывал вместе со своими коллегами-теоретиками на природе – в сплавах на катамаранах в районе Ленских Столбов по реке Буотома. По инициативе БЕГа премия, полученная в 1984 теоретиками ИКФИА на конкурсе работ СО АН СССР, была потрачена на приобретение катера, на котором потом был совершен не один дальний поход по Лене.

Нужно отметить, что, при всех своих достоинствах и независимости в суждениях, сам БЕГ не стеснялся обратиться в затруднительных ситуациях за советом к коллегам, которых он искренне уважал за их профессионализм и жизненную позицию. Особенно тепло он относился к ветеранам Великой отечественной войны. Опыт общения с БЕГом оказал большое влияние на его учеников при их становлении как ученых.

ПРОГНОЗ АКТИВНЫХ ФАЗ 24 ЦИКЛА И НАЧАЛА НОВОГО 25 ЦИКЛА ПО КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ. Оценка достоверности прогноза.

Козлов В.И.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера, СО РАН, Якутск, cosmoprognoz@mail.ru

По изучению динамики флуктуаций интенсивности галактических космических лучей на различных фазах текущего 24 цикла и начала нового 25 цикла обнаружен **переходный** режим к *активной фазе* солнечного цикла: http://www.forshock.ru/predlong.html, который определяется по наличию **предвестника** в космических лучах. Моменты регистрации предвестников в космических лучах совпадают с началом *перестроек* магнитного поля в комплексах активности на Солнце. В итоге, по космическим лучам *впервые* дан среднесрочный прогноз активных фаз 11-летнего солнечного цикла в течение всего 24 цикла с заблаговременностью $\Delta\boldsymbol{\tau}=\mathbf{2}\pm1$ оборота Солнца. Проведена *заверка* результатов среднесрочного (на масштабе усреднения 27 дней) мониторинга космических лучей и прогноза активной фазы (в период регистрации *серийных* событий) 24 цикла с данными прямых измерений на космических аппаратах США, *ACE*. В частности: модуля межпланетного магнитного поля и скорости плазмы солнечного ветра, а также потока низкоэнергичных протонов с энергией порядка ~**1** МэВ. Показана достоверность прогноза: *начала* 24 цикла, фазы *роста*, фазы *максимума*, фазы *переполюсовки*, геоэффективной фазы *начала ветви спада* и, достаточно неожиданной фазы *активизации* в окрестности минимума 24 цикла.

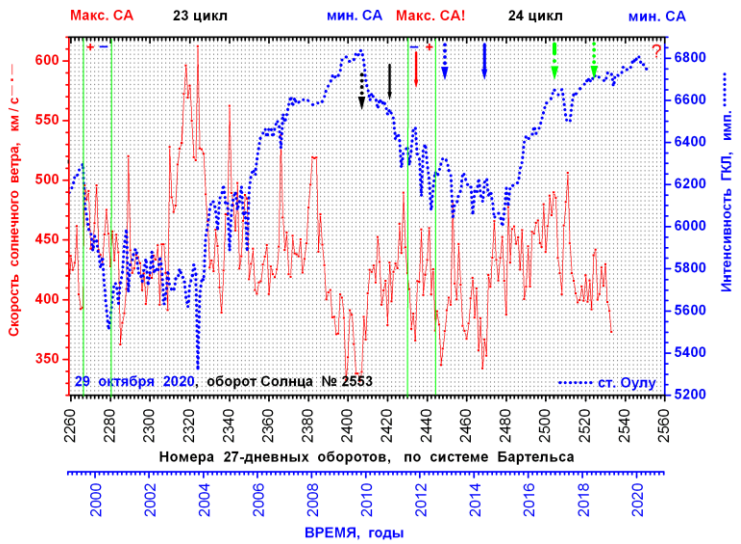


Рисунок 1. Результаты заверки прогнозов: http://www.forshock.ru/predlong.html (вертикальные стрелки) активных фаз солнечного цикла № 24 по результатам обнаружения переходных режимов в параметре флуктуаций ГКЛ - данными прямых измерений скорости солнечного ветра на космических аппаратах США, *ACE*.

ФОРМА СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ И СРЕДНЕСРОЧНЫЕ КОЛЕБАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Шибалова А.С.[1,2,4], Соколов Д.Д.[1,2,4], Обридко В.Н.[2], Пипин В.В.[3]

[1]*МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия*
[2]*ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия*
[3]*ИСЗФ РАН, г. Иркутск, Россия*
[4]*Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г. Москва, Россия*
as.shibalova@physics.msu.ru

Помимо хорошо известного 11-летнего цикла в вариациях солнечной активности можно выделить периодические изменения с меньшими характерными временами, от нескольких месяцев до 5 – 6 лет. Мы рассматривали 5-6-летние колебания (около половины основного цикла), наблюдаемые в изменениях числа солнечных пятен и напряженности дипольной составляющей магнитного поля Солнца. Сопоставление с различными моделями магнитного динамо позволяет определить возможную природу подобных колебаний. Похожий результат удается воспроизвести в модели динамо с нелинейным изменением параметров. Цикл активности в этом случае получается ангармоническим и содержит дополнительные периодичности помимо основной. Основа для задания нелинейности в теоретической модели — эффект магнитной плавучести.

Введение регулярных осцилляций α-эффекта в модель не дает нужного результата. Изменения с квзипериодом 5 лет при том выражены слабо, и модулируется 11-летнее колебание, что непохоже на реально наблюдаемую картину.

В результате исследования мы делаем вывод о связи 5-6-летних вариаций активности с процессами нелинейного насыщения динамо в недрах Солнца.

24 ЦИКЛ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ЭВОЛЮЦИЯ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЯТЕН ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА БСТ-2 КРАО РАН

Ахтемов З.С. , Цап Ю.Т., Клиорин Н.И., Малащук В.М.

КРАО РАН, Научный, Крым, azis@craocrimea.ru

На основе визуальных наблюдений расщепления зеемановских компонент линии FeI 6302.5 Å, проведенных на Башенном солнечном телескопе (БСТ-2) КрАО РАН, исследована эволюция усредненных за различные промежутки времени значений магнитного поля солнечных пятен за период с 2010 по 2018 г., напряженность которых ≥ 1500 Гс (всего 4771 измерений). Обнаружено, что, в отличие от чисел Вольфа, усредненное за 3 месяца, полгода или год, магнитное поле пятен со временем существенно не меняется. Более того, оно очень слабо возрастает и к концу 24 цикла активности Солнца достигает максимума, тогда как значения чисел Вольфа приближаются к нулю. Полученные результаты свидетельствуют о возможной важной роли «отрицательного магнитного давления» при формировании пятен вблизи поверхности Солнца.

Работа выполнена при частичной поддержки Минобрнауки НИР № 0831-2019-0006.

ЗАКОН ДЖОЯ И ДВЕ ПОПУЛЯЦИИ ГРУПП СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Наговицын Ю.А., Осипова А.А., Певцов А.А.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, nag-yury@yandex.ru

На основе данных Каталога солнечной деятельности Р.С. Гневышевой рассмотрено изменение угла наклона к экватору осей групп солнечных пятен в 1954-1989. Приведены аргументы в пользу того, что для вычисления тилт-угла β нужно учитывать изменение гелиографической сетки с широтой. Предложен новый подход к экспериментальному нахождению зависимости $\beta = f(\varphi)$, основанный на вычислении различных оценок типичного или «среднего в широком смысле» значения β в избранных интервалах широт φ. Показано, что для использованных данных по всем группам пятен классический – линейный – закон Джоя представляет собой лишь первое приближение и только для широт от -25º до +25º. За их пределами он нелинеен, что подтверждает вывод других авторов, сделанный по данным Маунт-Вилсон. Основной результат проведенного исследования: рассмотрение отдельно крупных долгоживущих групп LLG и мелких короткоживущих SSG показало, что зависимость $\beta = f(\varphi)$ имеет у них кардинально различающийся характер. Крутизна линейных участков также значимо отличается, (наклон LLG больше). Все это говорит о реальном различии свойств групп двух популяций.

Работа поддержана грантом программы МОН РФ № 075-15-2020-780.

ПЕРИОДЫ ВРАЩЕНИЯ ОБЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Ханейчук В.И., Котов В.А.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, пос. Научный, Крым, Россия,
han@craocrimea.ru

Проведён анализ измерений общего магнитного поля (ОМП) Солнца по измерениям разных обсерваторий за 1968-2019 гг. В спектрах мощности временного ряда наблюдается максимум в области периодов вращения Солнца с мощным пиком на частоте, соответствующей синодическому периоду 27.169 сут.

Однако детальный анализ с построением фазовой диаграммы и применением модифицированного вейвлет-анализа (для фиксированной фазы колебания) показал, что основными периодами вращения ОМП являются P_1=27.030 сут и P_2=26.935 сут. Они обнаруживаются на фазовой диаграмме (рис. 1, показаны значения фаз для пробного периода *P=27.000* сут). Наклон прямых на этом графике указывает на смещение фазы колебания со временем и позволяет определить точное значение периодов.

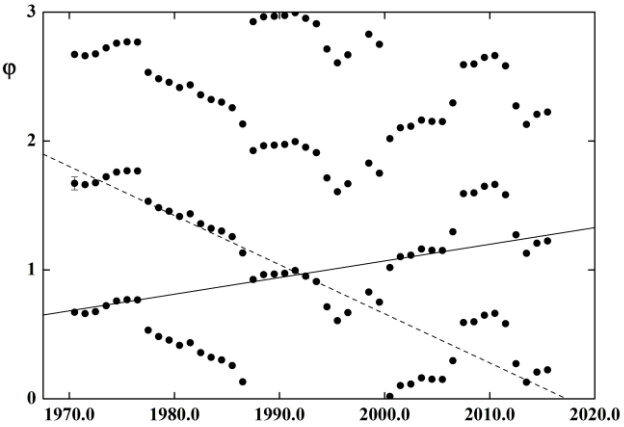


Рис. 1. Фазовая диаграмма для пробного периода *P=27.000* сут. Наклонные линии показывают смещение фазы периода и соответствуют значениям P_1=*27.030* сут (сплошная линия) и P_2=*26.935* сут (пунктир).

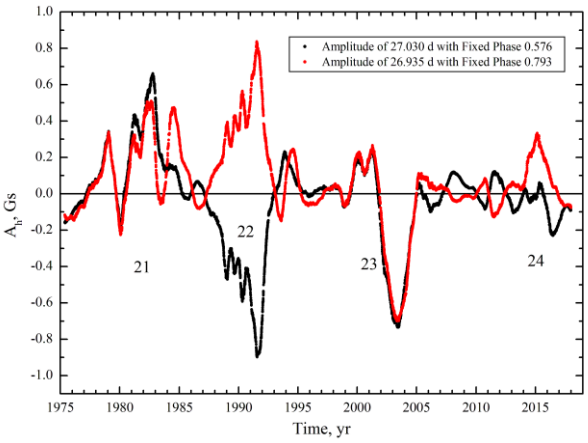


Рис. 2. Изменение амплитуды колебаний периодов P_1 и P_2 со временем, вычисленное для фиксированной фазы (отрицательные значения амплитуд означают, что колебание находится в противофазе по отношению к начальной, положительные – в фазе).

На рис. 2 показано изменение со временем амплитуды двух периодов, определенное по модифицированному методу вейвлит-анализа, где зафиксирована фаза и период колебания, а амплитуда может принимать отрицательные значения, если колебание находится в противофазе по отношению к начальной, и положительные – если в фазе. Видно, что колебания связаны между собой и находятся в одинаковой фазе в циклах 21 и 23, но в противофазе – в циклах 22 и 24. Биения между периодами P_1 и P_2 составляют 21 год.

Основным периодом вращения ОМП следует считать, по-видимому, P_2, поскольку амплитуда его колебания меняет свой знак от цикла к циклу, что соответствует поведению магнитных полей на Солнце.

Можно заключить, что Солнце проявляет себя в ОМП как преимущественно горизонтальный магнитный диполь (помимо вертикального), который вращается с синодическим периодом 26.935 сут, меняя свой знак на противоположный приблизительно каждые 10.5 лет.

О ПРИРОДЕ ДВУХЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Kleeorin N., Rogachevskii I., Кузанян К. М.

BGU, Beer-Sheva, Israel, nat@bgu.ac.il, gary@bgu.ac.il

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, kuzanyan@izmiran.ru

Волны Россби [1] представляют собой важное атмосферное и океаническое явление и в совокупности объясняют такие эффекты асимметрии «холодно – жарко» между западным и восточными полушариями земли, а при учёте стратификации плотности эффекты типа «Эл-Ниньйо» и «Ла-Нинья» (т. н. медленные волны Россби [2]). Не исключено, однако, что эти волны играют заметную роль и в контексте физики Солнца и звезд. В теории звёздных пульсаций (см., например, [3]) эти колебания часто называют крутильными и при этом специально подчёркивается, что эти колебания не осесимметричны. Наоборот, в физике Солнца, крутильными колебаниями принято называть осесимметричные волны колебаний зональных течений с периодом около 11 лет, [4]. Эти возмущения скорее всего являются результатом воздействия крупномасштабных сил Ампера, связанных со средним полем [5], [6], [7]. Что бы избежать путаницы, мы в дальнейшем будем называть изучаемое явление просто волнами Росби, возможно модифицированными магнитным полем Солнца.

В докладе рассматривается вопрос о возможной природе двухгодичных колебаний солнечной активности. В качестве возможного механизма этих колебания рассматриваются модифицированные средним магнитным полем Солнца волны Россби. Показано, что существует несколько мод (около 38) волн Россби, обеспечивающих двухгодичные колебания. Среди них выделенной модой является мода с $\ell = 7$, $m = 1$. Именно эта мода может существовать одновременно как в конвективной, так и в лучистой зоне Солнца, влияя одновременно как на солнечную активность, так и, возможно, на нейтринный поток, модулируя ядерные реакции в центральной части лучистой зоны.

1. C. G. Rossby // J. Mar. Res. 1939 V. **2**, P. 38.
2. T. Elperin, N. Kleeorin & I. Rogachevskii // Phys. Rev. E 2017 V. **96**, P. 033106
3. H. Saio // Astrophys. J., 1982 V. **256**, P. 717.
4. B.J. LaBonte, and R. Howard // Solar. Phys. 1982 V. **75**, P. 161.
5. M. Schusler // Astron. and Astrophys. 1981, V. **9**, L17-186.
6. H. Ioshimura //Astrophys. J., 1981, V. **247**, P. 1102.
7. Н.И. Клиорин, А.А. Рузмайкин // Письма в Астроном. журнал, 1984, Т. **10**, С. 925.

О ВКЛАДЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ДИНАМО В ГЕНЕРАЦИЮ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В НЕВОЗМУЩЕННОЙ ФОТОСФЕРЕ СОЛНЦА

Абраменко В.И.[1], Юрчишин В.Б.[2]

[1] *ФГБУН КРАО РАН, п. Научный, Крым, Россия, vabramenko@gmail.com*

[2] *BBSO NJIT, Big Bear City, CA, USA*

Анализ пространственного спектра мощности магнитного поля [1] трех областей невозмущенной фотосферы (корональная дыра, область невозмущенного Солнца в закрытых полях и флоккульная зона) по данным SDO/HMI показал очень близкий наклон спектра -1.0 ± 0.05 в интервале примерно от 20-10 до 2.4 Мм. Это предполагает, что один и тот же механизм генерации магнитного поля (турбулентное динамо) работает по всей невозмущенной фотосфере. Сравнение пространственного спектра мощности магнитного поля, полученного по наблюдениям Near InfraRed Imaging Spectropolarimeter (NIRIS, Goode Solar Telescope, GST, Big Bear Solar Observatory), со спектром колмогоровского типа (наклон -5/3) позволило нам заключить, что по меньшей мере 35% магнитной энергии в диапазоне 3.5-0.3 Мм невозможно объяснить колмогоровским каскадом (дроблением крупных структур на более мелкие) и требует объяснения другими механизмами генерации магнитного поля или передачи энергии вдоль спектра. Одно из наиболее вероятных объяснений – работа турбулентного динамо в фотосферном и подфотосферном слоях.

Данные наблюдений инструмента NIRIS (Рис.1) были сопоставлены с одновременными наблюдениями SDO/HMI для одного и того же участка на поверхности Солнца. Детальное сопоставление показало, что в тех местах, где SDO/HMI регистрирует обширные магнитные элементы напряженностью не выше 700 Гс, NIRIS регистрирует одну или несколько магнитных трубок диаметром 200-400 км и напряженностью поля 1000-2000 Гс. Таким образом, прямые наблюдения показывают присутствие килогауссных трубок в солнечной фотосфере. Более того, оказалось, что килогауссные трубки имеют тенденцию группироваться в межгранульных пространствах в непосредственной близости от так называемых ярких точек, видимых с помощью GST в линии TiO (см. Рис.1, слева).

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-12-00131.

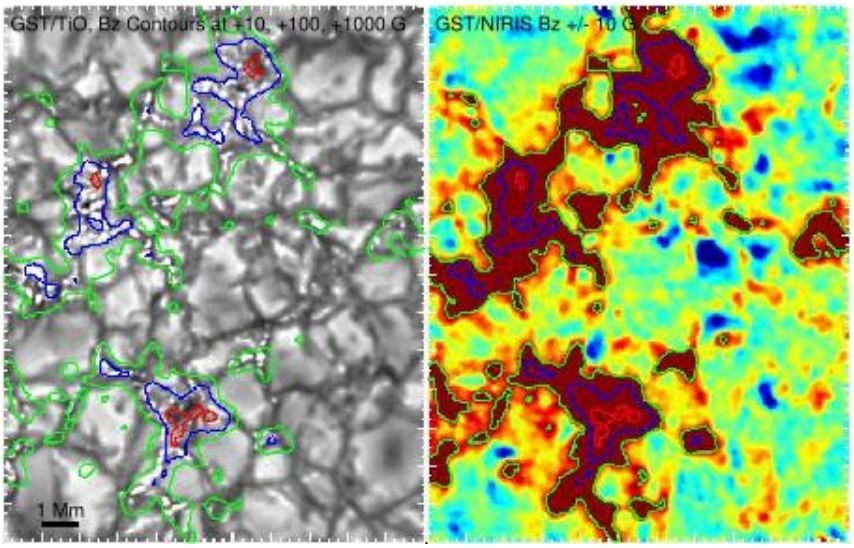


Рисунок 1. Участок спокойного Солнца по данным NIRIS/GST/BBSO: справа – магнитограмма (зеленые, синие, красные контуры соответствуют 10, 100, 1000 Гс). Слева – та же магнитограмма, наложенная на GST-изображение в линии TiO.

1. Abramenko V.I., Yurchyshyn V.B. // MNRAS 2020. V. **497**, P.5405.

Вариации параметров динамо цикла в зависимости от периода вращения Солнца

Пипин В.В.,
Институт солнечно-земной физики, Иркутск

Обсуждаются результаты расчетов нелинейных моделей динамо для солнечных аналогов с периодами вращения в диапазоне от 1 до 30 дней. Рассмотрено поведение различных параметров магнитного цикла, таких как период динамо цикла, амплитуда, вариации потока магнитной энергии и светимости, а также эффективность производства магнитной спиральности. Кинематические модели динамо, построенные с учетом нелинейного α-эффекта и магнитной плавучести, показывают уменьшение периода магнитного цикла и одновременный рост амплитуды цикла с уменьшением периода вращения звезды. Пространственно-временная структура динамо-волн магнитной активности в кинематических моделях соответствует волнам Паркера-Йошимуры. Звёзды с периодом вращения менее 10 суток показывают нестационарные долговременные вариации магнитной активности. Некинематические модели динамо учитывают обратное влияние магнитного поля на дифференциальное вращение и перенос тепла внутри конвективной зоны. Они показывают немонотонное изменение периода динамо со скоростью вращения. Модели для периодов вращения менее 10 дней показывают нестационарную эволюцию с небольшим увеличением периода динамо при уменьшении периода вращения звезды. Некинематические модели показывают рост магнитного потока, генерируемого динамо, с увеличением скорости вращения. Для звезды, вращающейся с периодом два дня и менее, существует динамо-насыщение. Насыщение параметров магнитной активности сопровождается депрессией дифференциального вращения и изменением направления меридиональной циркуляции. Пространственно-временная структура волн магнитной активности на звёздах с периодом вращения менее 5 суток близка к динамо адвективного типа, при котором период цикла определяется меридиональной циркуляцией.

Литература:

Pipin, V. V., Solar dynamo cycle variations with a rotational period, arXiv:2008.05083, accepted in MNRAS, doi:10.1093/mnras/stab033

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛИЧЕСТВА И ПЛОЩАДЕЙ АНТИ-ХЕЙЛОВСКИХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В ПЕРИОД С 1989 ПО 2019 ГГ.

Жукова А.В.[1], Хлыстова А.И.[2], Абраменко В.И.[1], Соколов Д.Д.[3,4,5]

[1]*КрАО РАН, пгт. Научный, Крым, Россия,* anastasiya.v.zhukova@gmail.com

[2]*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия,* hlystova@mail.iszf.irk.ru

[3]*МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия,* sokoloff.dd@gmail.com

[4]*Московский центр фундаментальной и прикладной математики, г.Москва, Россия*

[5]*ИЗМИРАН имени Н.В.Пушкова, г. Троицк, г. Москва, Россия*

Данные инструментов HMI/SDO и MDI/SOHO, а также Debrecen Photoheliographic Data позволили получить статистику 8703 активных областей (АО), появлявшихся на солнечном диске в период с 01.01.1989 по 31.12.2019. 277 из исследованных АО были определены как анти-Хейловские группы солнечных пятен. При их идентификации применялись критерии, предложенные в работе [1]; использовались данные каталога анти-Хейловских АО, доступного на сайте КрАО https://sun.crao.ru/databases/catalog-anti-hale.

Продолжение исследований, начатых в работе [2], показало следующее. Выявленное ранее возрастание относительного количества анти-Хейловских АО в минимуме нескольких циклов [2, 3], было обнаружено также и в минимуме 24-го цикла. Исключение из выборки различных подмножеств анти-Хейловских АО не изменяет результат качественно. Данный результат подтверждает предположение о проявлении флуктуационного (мелкомасштабного) динамо в момент наименьшего воздействия глобального динамо (в солнечном минимуме).

Проведено сравнение временных изменений относительного количества и относительных площадей анти-Хейловских АО, охватывающее три солнечных минимума. Высота пиков в минимуме для относительных площадей в целом несколько ниже, чем для относительного количества АО. Это объясняется большой долей малых (в основном менее 20 м.д.п.) короткоживущих (менее трех дней) групп среди всех анти-Хейловских АО, которые составляют более трети выборки (98 из 277). В случае исключения таких групп из выборки высота пиков для относительных площадей анти-Хейловских АО превышает высоту пиков для относительного их количества. Это может свидетельствовать о несколько бóльших размерах магнитных трубок анти-Хейловских АО по сравнению трубками обычных групп.

Во втором максимуме каждого из исследованных циклов было отмечено появление дельта-структур с анти-Хейловской ориентацией магнитного поля, существенно превышающих по площади обычные АО. Это согласуется с данными о более высоком удельном (приходящемся на одну АО) магнитном потоке АО с нарушениями закономерностей теории динамо [4]. Появление дополнительной энергии, усиливающей магнитный поток АО во втором максимуме, также может быть связано с воздействием флуктуационного динамо в момент, когда влияние глобального динамо начинает ослабевать.

А.Х. благодарит за поддержку грант РФФИ 19-52-45002. Работа А.Ж. и В.А. частично выполнена в рамках НИР 0831-2019-0006. Работа А.Х. выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16.

1. Zhukova A.V., Khlystova A.I., Abramenko V.I., Sokoloff D.D. // Solar Phys. 2020. **295.** 165.
2. Sokoloff D.D., Khlystova A.I., Abramenko V.I. // MNRAS. 2015. **451.** 1522.
3. McClintock B.H., Norton A.A., Li J. // Astrophys. J. 2014. **797**. 130.
4. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // Geomag. Aeron. 2018. **58**. 1159.

КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ 24-ГО ЦИКЛА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ SDO

Андреева О.А., Абраменко В.И., Малащук В.М.

КрАО РАН, Научный, Крым, Россия, olga@craocrimea.ru

По данным наблюдений инструментом Atmospheric Imaging Assembly (AIA), канал 19.3 нм, на борту Solar Dynamic Observatory (SDO) исследована эволюция корональных дыр (coronal holes, CHs) на протяжении 24 цикла. Для локализации CHs и определения их площадей мы воспользовались базой Гелиофизических событий HEK - Heliophysics Event Knowledgebase. Нами был создан массив ежедневных суммарных площадей корональных дыр (Sch) за период 13.05.2010-31.12.2020 гг. (на Рис.1 верхняя панель - Sch всей видимой поверхности диска Солнца, средняя и нижняя – Sch северной (N) и южной (S) полусфер). Целью данной работы было проанализировать, как менялись площади и локализация CHs на Солнце в этот период, имелись ли различия в площадях, занятых CHs в разных полушариях, выявить особенности поведения полярных и неполярных CHs в разных фазах цикла.

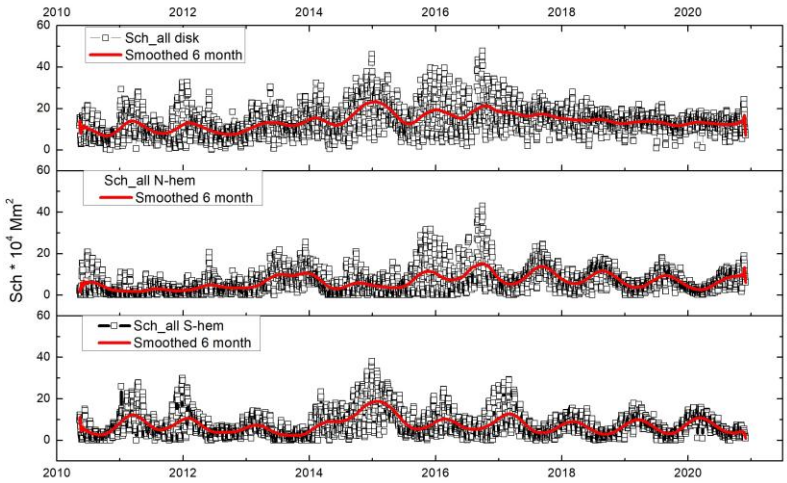


Рис.1

В работе отмечена N - S асимметрия в появлении CHs на диске Солнца (на средней и нижней панелях Рис.1 красные кривые - сглаженные за полгода Sch для N и S полусфер соответственно). В начале цикла по площадям CHs доминировала S полусфера, после 2012 года начала доминировать N полусфера. В первом максимуме (т.е., в период 2014 -2015 годов) преимущественная локализация CHs опять сместилась в S полушарие. Второй максимум 24 цикла (2015-2016 годы) совпал с увеличением площадей CHs в N полусфере, после чего максимальные амплитуды площадей CHs в обеих полусферах уменьшились**.** Волнообразный характер изменения площадей обусловлен изменением угла b_o.

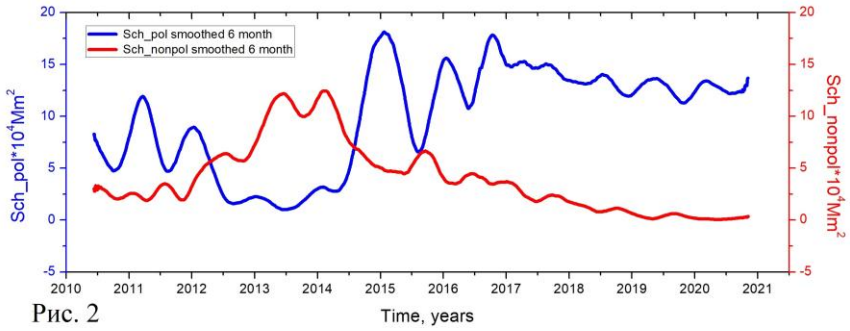


Рис. 2

Нами также изучены особенности изменения ежедневных суммарных площадей полярных (Sch_pol) и неполярных (Sch_nonpol) CHs (Рис. 2 - синяя и красная кривые, соответственно) в течение 24 цикла. Показано, что ежедневная суммарная площадь полярных CHs увеличивается в минимумах солнечной активности и снижается в максимуме цикла. Это согласуется с общим представлением о полярных CHs, как основном источнике дипольного магнитного поля Солнца. При этом второе подмножество – выделенные неполярные CHs, показывают интересное, не наблюдаемое ранее поведение на фазе спада солнечной активности. Их площади медленно убывают от максимума солнечного цикла до минимума. Качественно этот тренд согласуется с уменьшением пятенной активности к минимуму, что позволяет предположить наличие физической связи этих двух явлений.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЕЛЬ МЕТОДОМ БАЙЕСОВСКОГО АНАЛИЗА ПО ДАННЫМ SDO/AIA

Анфиногентов С.А.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, anfinogentov@iszf.irk.ru

Задача определения плотности и температуры отдельных структур корональной плазмы важна как для понимания фундаментальных физических процессов, протекающих в солнечных активных областях, так и для задачи прогноза солнечной активности. Особую важность эти сведения приобретают в контексте корональной МГД-сейсмологии. Например, измерения плотности и контраста плотности плазмы необходимы для определения величины коронального магнитного поля по наблюдениям изгибных колебаний корональных петель.

В докладе представлен метод определения плотности и температуры плазмы структур солнечной короны, таких как магнитоплазменные петли и струи, по данным наблюдений SDO/AIA. Методика основана на численном моделировании поперечных профилей температуры и плотности в петле и последующем расчете инструментального отклика SDO/AIA. Корональные петли и струи моделируются, как изотермические структуры цилиндрической формы. Радиальный профиль плотности задается профилем Эпштейна. Такая параметризация позволяет, в частности, регулировать плавность изменения параметров плазмы на границе между плотной внутренней частью структуры и разряженной фоновой плазмой. Затем решается уравнение переноса КУФ излучения в оптически тонком режиме для искусственных КУФ изображений в 6 каналах SDO/AIA. Разработанная численная модель корональной структуры имеет порядка 20 свободных параметров, описывающих как свойства самой петли (плотность и температуру), так и излучение фоновой плазмы, наблюдаемое SDO/AIA.

Для определения физических параметров корональной плазмы в корональной петле или струе, свободные параметры модели должны быть выбраны таким образом, чтобы обеспечить наилучшее согласие результатов моделирования с наблюдательными данными. В рамках представленного исследования такая задача решается методом Байесовского анализа с применением метода Монте-Карло по схеме Марковской цепи. Данная методология была протестирована на нескольких корональных петлях, включая как «холодные» петли спокойных активных областей, так и более горячие вспышечные петли. Во всех рассмотренных случаях удалось с хорошей точностью измерить температуру, плотность и толщину корональных петель.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ в рамках проекта 18-29-21016 мк.

ПАМЯТИ УШЕДШИХ КОЛЛЕГ. ВКЛАД В ФИЗИКУ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ: ОТ ТЕОРИИ И ЭКСПЕРИМЕНТА К ПРАКТИЧЕСКОМУ ПРИМЕНЕНИЮ.

Кузнецов В.Д.

ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия, kvd@izmiran.ru

В докладе, посвященном памяти сотрудников ИЗМИРАН В.В.Белого, Ю.Д.Жугжды, Ю.Я.Ружина, Ю.М.Михайлова, С.П.Гайдаш, ушедших в 2020-2021 гг., рассказывается об их вкладе в исследования по физике плазмы Солнечной системы.

Д.ф.-м.н. Вячеслав Владимирович Белый, лауреат Государственной премии Российской Федерации, внес большой вклад в исследования нестационарных явлений в ионосфере радиофизическими методами, в кинетическую теорию квантовых явлений в плазме. В последние годы его научные интересы были связаны с обобщением флуктуационно-диссипативной теоремы на случай неоднородной плазмы, с развитием метода томсоновского рассеяния, являющегося одним из основных методов диагностики плазмы.

Д.ф.-м.н. Юзеф Данилович Жугжда, лауреат Государственной премии СССР, внес большой вклад в теоретические и экспериментальные исследования плазменных процессов на Солнце. Им выполнены теоретические работы по колебательной конвекции, по колебаниям в солнечных пятнах, МГД волнам в магнитных трубках и в солнечной атмосфере и др. Он внес существенный вклад в составление научной программы космических солнечных проектов серии КОРОНАС (КОРОНАС-И, КОРОНАС-Ф, КОРОНАС-ФОТОН), в подготовку и реализацию на этих спутниках экспериментов по изучению глобальных колебаний Солнца (эксперименты ДИФОС-И, ДИФОС-Ф, СОКОЛ).

Д.ф.-м.н. Юрий Яковлевич Ружин, лауреат Государственной премии Российской Федерации, внес большой вклад в изучение плазменных и электромагнитных процессов в околоземном космическом пространстве, в магнитосфере и ионосфере Земли методом активных экспериментов и радиотомографии. С его участием осуществлен целый ряд космических проектов в рамках отечественных и международных программ («Omega», «Зарница 1,2», АРАКС, «Сполох», PORCUPINE, CRRES, АПЭКС и др.), серия экспериментов на МКС.

Д.ф.-м.н. Юрий Михайлович Михайлов, внес большой вклад в исследование низкочастотных волновых процессов в околоземном космическом пространстве и межпланетной среде. Под его руководством была разработана аппаратура для регистрации низкочастотных процессов в космической плазме (АНЧ-2МЕ), которая в течение многих лет успешно функционировала на спутниках «Интеркосмос–18, 19, 24, 25», «Ореол-3», «Космос-1809»,. был активным участником проекта «ВЕГА», занимался исследованиями сейсмоэлектромагнитных явлений с использованием спутниковых и наземных данных, подготовкой научной аппаратуры для спутников проекта «Ионосфера».

К.ф.-м.н. Сергей Петрович Гайдаш, руководитель Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН, внес большой вклад в создание Центра, разработку методик прогнозирования космической погоды, в обеспечение бесперебойной работы Центра и снабжение прогнозами организаций Роскосмоса, МЧС и других ведомств. Активно взаимодействовал со средствами массовой информации по вопросам космической погоды.

ГЕЛИОСЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ПРОЦЕССОВ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО

Косовичев А.Г.[1], Гетлинг А.В.[2], Пипин В.В.[3]

[1]*New Jersey Institute of Technology, Newark, U.S.A., alexander.g.kosovichev@njit.edu*

[2]*МГУ, г. Москва, Россия,* [3]*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Анализ гелиосейсмологических наблюдений внутренней динамики Солнца на протяжении двух последних циклов солнечной активности позволяет проследить развитие процессов солнечного динамо по всей глубине конвективной зоны и связать их с моделями солнечных циклов. Наблюдательные данные, полученные с космических аппаратов SoHO (1996–2010) и SDO (2010–2020), представляют собой измерения внутреннего дифференциального вращения, меридиональной циркуляции, термодинамических параметров и их пространственно-временных вариаций.

В результате анализа данных выявлены структура и динамика зональных течений плазмы, отражающие процессы генерации и переноса магнитных полей внутри Солнца. Показано, что активные широты и области сильного полярного поля на поверхности Солнца совпадают с областями торможения зональных течений («крутильных колебаний»). Наблюдаемая структура зональных течений и их широтная и радиальная миграция в глубоких слоях конвективной зоны соответствуют динамо-волнам, предсказанным теориями динамо и численными МГД моделями.

Анализ данных показал, что развитие нового солнечного цикла начинается на высоких широтах (~60°) в основании конвективной зоны во время максимума предыдущего цикла. Затем процесс миграции зональных течений к поверхности Солнца разделяется на две ветви: быструю (за 1–2 года) миграцию в высокоширотной зоне и медленную миграцию на средних и низких широтах в течение ~10 лет. При этом установлено определяющее влияние подповерхностного слоя сдвиговых течений («лептоклины») в формировании «диаграммы-бабочки» солнечной активности. На поверхности формируется широтно-временная диаграмма «протяженного» 22-летнего цикла зональных течений, ранее известного из наблюдений допплеровских скоростей и структуры солнечной короны.

Наблюдаемые вариации меридиональной циркуляции также соответствуют широтно-временной структуре «протяженного» солнечного цикла. Эти вариации представляют собой циркуляционные ячейки вокруг зон пятнообразования. Новый анализ показал, что циркуляционные ячейки не связаны с втеканием плазмы в активных областях, как считалось ранее, а отражают глобальные процессы солнечного динамо, так как они наблюдаются и при отсутствии активных областей во время солнечного минимума.

Разработанная в рамках теории среднего поля самосогласованная МГД модель солнечного динамо находится в хорошем качественном и количественном согласии с наблюдениями. Модель показывает, что наблюдаемые вариации внутренних течений и явление протяженного солнечного цикла связаны с воздействием магнитного поля на конвективный теплоперенос и соответствующей модуляцией меридиональных течений. Модель объясняет, почему напряженность полярного поля в солнечном минимуме предсказывает последующий максимум, и указывает на новые возможности прогноза солнечных циклов по гелиосейсмологическим данным.

1. Kosovichev A.G., Pipin V.V. // ApJL 2019. V. **871.** P. 20.
2. Pipin V.V., Kosovichev A.G. // ApJ 2019. V. **887.** id. 215.
3. Pipin V.V., Kosovichev A.G. // ApJ 2020. V. **900**. Id 26.
4. Getling A.V., Kosovichev A.G., Zhao, J. //ApJ 2021, in preparation.

ДОЛГОВРЕМЕННАЯ АКТИВНОСТЬ МОЛОДОГО КАРЛИКА V833 TAU

Кацова М.М. (1), Бондарь Н.И. (2), Степанов Р.А., (3), Соколов Д.Д. (4, 5, 6), Фрик П.Г.(3)

(1) ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова maria@sai.msu.ru mkatsova@mail.ru

(2) Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, Крым

(3) Институт механики сплошных сред СО РАН, Пермь

(4) Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

(5) ИЗМИРАН им.Н.В.Пушкова, Троицк, Москва

(6) Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва

Магнитная активность Солнца демонстрирует циклическое поведение, которое часто встречается и у звёзд малых масс. Фотометрические ряды для изучения звёздной активности являются аналогами рядов чисел Вольфа, поскольку связаны с развитием пятен на поверхности звезды, приводящим к переменности ее блеска. Долговременный мониторинг, дополненный данными фотографических архивов, даёт возможность получить кривые блеска длиной около 100 лет. У некоторых звёзд действительно выявлены более или менее регулярные циклы. Однако другие звёзды демонстрируют двойные и даже множественные циклы, что требует отдельного рассмотрения – необходимо отделить «истинные» циклы от стохастических вариаций. Соответствующий вейвлет-анализ использован для анализа компилятивного ряда данных о долговременных изменениях блеска молодой быстро вращающейся звезды V833 Tau (K2.5 V) длиной 120 лет. Оказалось, что интегральный вейвлет- спектр звезды в интервале от 3 до 100 лет меняется по степенному закону и сравним с частотным солнечным спектром в интервале от 0.1 до 10 лет. В спектре звезды нет выделяющихся пиков, как это наблюдается для 11-летнего солнечного цикла.

Мы обнаружили, что наблюдаемые вариации V833 Tau с характерными временами 2–50 лет должны быть сопоставимы с известными квазипериодическими солнечными среднесрочными вариациями, тогда как истинный цикл V833 Tau, если он существует, должен составлять около века или даже дольше. Этот вывод не противоречит ожиданиям теории звёздного динамо. Действительно, уровень активности этой звезды очень высок и соответствует насыщенному режиму звёздной активности, при котором динамо усиливает квазистационарное магнитное поле с хаотическими изменениями, но без ярко выраженного цикла. Однако нельзя исключить ситуацию, при которой V833 Tau имеет, по сути нестабильное динамо, и тогда длительность цикла меняется в интервале периодов 10–40 лет. Поэтому желательно продолжать мониторинг активности этой звезды.

ВОСХОДЯЩИЕ ПОТОКИ ВЕЩЕСТВА В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА

Тлатов А.Г., Березин И.А.

Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Россия, tlatov@mail.ru

В данной работе мы изучаем потоки вещества на изображениях полного диска Солнца в линии Н-альфа по данным наблюдения патрульного солнечного телескопа-спектрогелиографа, установленного на Горной астрономической станции в Кисловодске (Россия). Телескоп регистрирует полный профиль спектральных линий, что позволяет исследовать их характеристики в активных и спокойных областях Солнца. Телескоп ведет непрерывные наблюдения Солнца со временем сканирования диска около одной минуты. Мы выполнили анализ данных наблюдений в период 09.2015-07.2020 гг. Обнаружено, что в активных областях Солнца, видимых на диске Солнца как области яркой интенсивности, присутствуют восходящие потоки вещества. Средняя скорость восходящих потоков составляет около V_{av}~500 m/s. Максимальные скорости в ярких областях имеют максимум распределения V_{mx} ~ 2000 m/s. Скорость слабо меняется от фазы солнечного цикла, площади и относительной яркости активных областей и направлена, преимущественно, вертикальна вверх.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы ОФН РАН 12.

ВЛИЯНИЕ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ НА МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕНИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН

Загайнова Ю.С.[1], **Файнштейн В.Г.**[2]

1 – г. Москва, Троицк, ИЗМИРАН; 2 – г. Иркутск, ИСЗФ СО РАН

Когда взрывные процессы с большим энерговыделением (вспышки, возникновение корональных выбросов массы (КВМ)) происходят в активных областях (АО), формируемых солнечными пятнами, то они оказывают влияние на свойства пятен, в том числе на магнитные свойства тени пятен. Данная работа является продолжением наших исследований о влиянии взрывных процессов на характеристики магнитного поля в тени солнечных пятен АО. В этой работе мы провели сравнительный анализ влияния взрывных процессов на две характеристики поля: углы силовых линий поля к радиальному направлению α из центра Солнца и величину магнитного поля B. В качестве характеристики угла наклона линий поля мы использовали минимальный и средний в пределах тени пятна углы α_{min} и α_{av}. В качестве меры магнитного поля использовались максимум магнитной индукции B_{max} и ее среднее в пределах тени значение B_{av}. Анализировались периоды времени +/- 6 часов относительно начала вспышки. Показано, что взрывные процессы оказывают сильное влияние на α_{min} и α_{av}, приводя к разнообразным изменениям поведения этих характеристик после начала вспышки, включая резкие скачки с увеличением или уменьшением углов в несколько (вплоть до 10) раз. Изменения со временем α_{min} и α_{av} часто не коррелируют друг с другом, но их поведение оказывается близким в событиях с сильными вспышками и быстрыми КВМ. Влияние взрывных процессов на B_{max} и B_{av} оказалось более умеренным (разнообразные изменения поля от нескольких десятков до примерно 400 Гс после начала вспышки при характерном значении B_{max} ~2500 Гс и B_{av}~1900 Гс перед началом вспышки). Еще одна особенность поведения α_{min} и α_{av}, а также B_{max} и B_{av} во всех рассмотренных пятнах – наличие колебаний этих параметров магнитного поля с различными частотами. Для большого количества отобранных пятен, в которых наблюдались заметные изменения углов и/или характеристик поля, были построены и сопоставлены спектры мощности колебаний α_{min} и α_{av} и B_{max} и B_{av}. Для группы пятен с резкими изменениями углов или поля в момент начала вспышки (to) спектры мощности были сопоставлены для периодов времени до и после to. Анализ показал, что имеются различия в спектрах мощности углов и поля. Возможные причины этого различия обсуждаются. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 20-02-00150.

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ТОКОВЫХ СИСТЕМ В ОБЛАСТЯХ РАЗНЫХ МАГНИТО-МОРФОЛОГИЧЕСКИХ КЛАССОВ

Фурсяк Ю.А., Абраменко В.И., Жукова А.В.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, 298409, п. Научный, Республика Крым, Россия, yuriy_fursyak@mail.ru

На основе данных о компонентах вектора магнитного поля в фотосфере, получаемых прибором Helioseismic and Magnetic Imager на борту Solar Dynamics Observatory (HMI/SDO) были вычислены параметры магнитных полей и электрических токов для 69 активных областей (АО) 24-го цикла солнечной активности. АО были разделены по магнито-морфологическим классам [1]: биполярные АО, подчиняющиеся законам теории динамо среднего поля (закон Хейла, закон Джоя и т.п.) классифицированы как регулярные АО (класс A); униполярные пятна – как класс U; все остальные – нерегулярные АО – как класс B. Вычисленные параметры токов были сопоставлены со вспышечным индексом [2]. Получены следующие результаты: 1) Наиболее высокая корреляция параметров тока с уровнем вспышечной активности наблюдается для двух параметров: суммарного беззнакового тока в АО, (коэффициент корреляции Пирсона k = 0.69, Рис. 1), и средней беззнаковой плотности вертикального электрического тока (k = 0.65); 2) Наиболее сильные вспышки рентгеновских классов M и X наблюдаются в АО, для которых величина средней беззнаковой плотности вертикального тока превышает пороговое значение 2.7 мА м$^{-2}$; 3) При сопоставлении параметров электрического тока с морфологическим классом можно выделить группу униполярных областей, для которых параметры электрического тока будут иметь сравнительно низкие значения. Анализ 69 АО позволяет обнаружить в среднем более высокие значения параметров электрического тока для областей группы B, что может указывать на дополнительную накачку энергии в подфотосферных слоях активной области за счет механизмов локального динамо.

Работа выполнена при частичной поддержке грантом РНФ 18-12-00131.

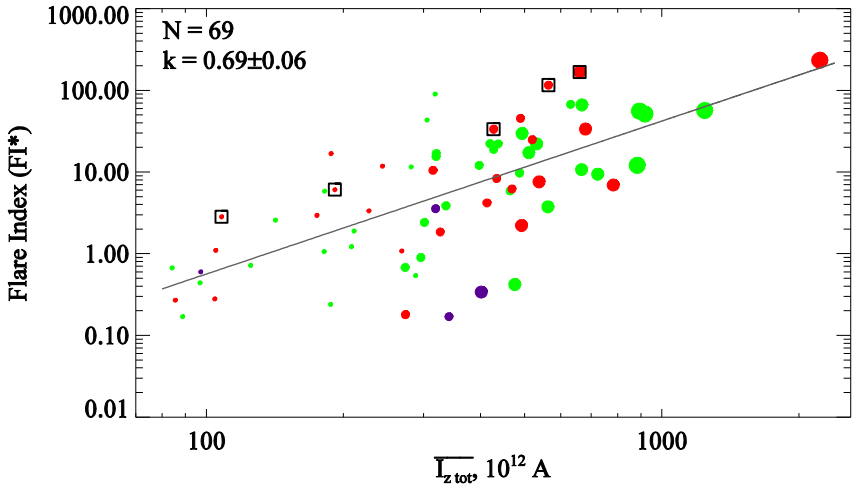


Рис. 1. График зависимости между величиной суммарного беззнакового тока и вспышечным индексом, вычисленным за время мониторинга АО. Фиолетовыми точками отмечены области класса U, зелеными – класса A, красными – «области-нарушители» класса B. Размеры точки пропорциональны величине магнитного потока области. Черными квадратиками дополнительно отмечены АО с нарушением закона полярностей Хейла.

1. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // Geomagnetism and Aeronomy 2018. Vol. **58**. P. 1159.
2. Abramenko V.I. // Astrophys. J. 2005. Vol. 629. P. 1141.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАТУХАНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Плотников А.А., Куценко А.С.

Крымская астрофизическая обсерватория РАН, plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

В работе проведен анализ динамики затухания абсолютного магнитного потока для большого количества активных областей (АО). Выделение участка затухания из графика зависимости величины потока от времени производилось автоматически. Алгоритмом были обработаны данные SDO/HMI с 2010 по 2018 год, выделены участки затухания для 839 активных областей.

На рис. 1 показана зависимость интенсивности затухания потока от максимального значения потока в АО. В целом, наблюдается, что скорость угасания АО пропорциональна максимальному потоку в области, однако заметна группа областей, заметно отклоняющаяся от общей зависимости. Разделение по магнитной классификации показывает, что эта группа состоит из униполярных АО.

Подобный эффект может указывать на особую магнитную конфигурацию униполярных АО.

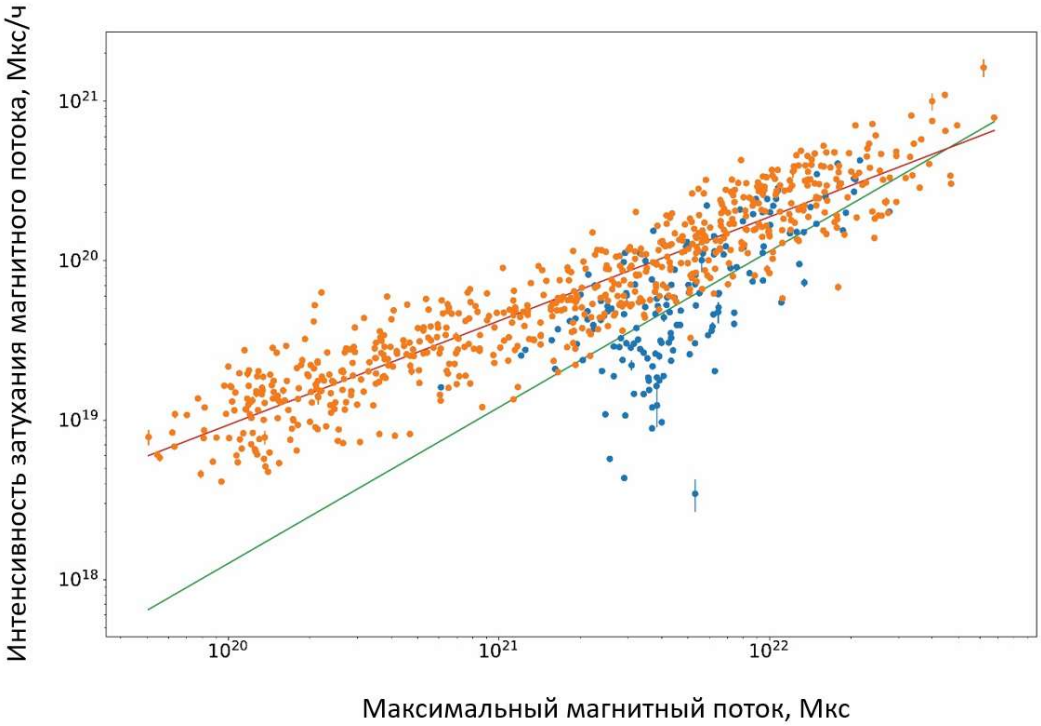


Рис. 1. Зависимость интенсивности затухания магнитного потока от максимального магнитного потока. Синим цветом выделены униполярные АО. Прямыми показана линейная регрессия для двух групп – униполярных АО и всех остальных.

Работа поддержана грантом РНФ №18-12-00131.

ОСОБЕННОСТИ ЭВОЛЮЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ №12673

Головко А.А., Салахутдинова И.И.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, golovko@iszf.irk.ru

Активная область №12673 показала высокую вспышечную активность и произвела 4 вспышки класса X 6, 7 и 10 сентября 2017 г. Изучению эволюции магнитного поля в ней посвящены работы [1-3].

Проведен анализ магнитограмм полного вектора и карт лучевых скоростей, полученных 5-8 сентября 2017 г с помощью инструмента SOT Hinode, имеющего пространственное разрешение 0.32”, с использованием метода мультифрактальной сегментации [4]. Площадь новых магнитных потоков достигла значительной величины и показала сильную вариабельность. В период 9 -13 час UT 6 сентября, когда произошли гомологичные вспышки баллов X2.2 и X9.3, скорость изменения магнитного потока достигла аномально большой величины $4x10^{21}$ Мкс/час. Оценка той величины за 6-часовой интервал 3 сентября в работе [1] составила $1.12x4x10^{21}$ Мкс/час. Магнитограммы, полученные непосредственно во время этих вспышек, показали быструю динамику магнитных транзиентов в окрестности основной линии раздела полярностей, а карты лучевых скоростей выявили области сильной перемежаемости мелкомасштабной структуры. Эти особенности исчезают в интервалы времени между вспышками.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы фундаментальных научных исследований ФНИ II.16.

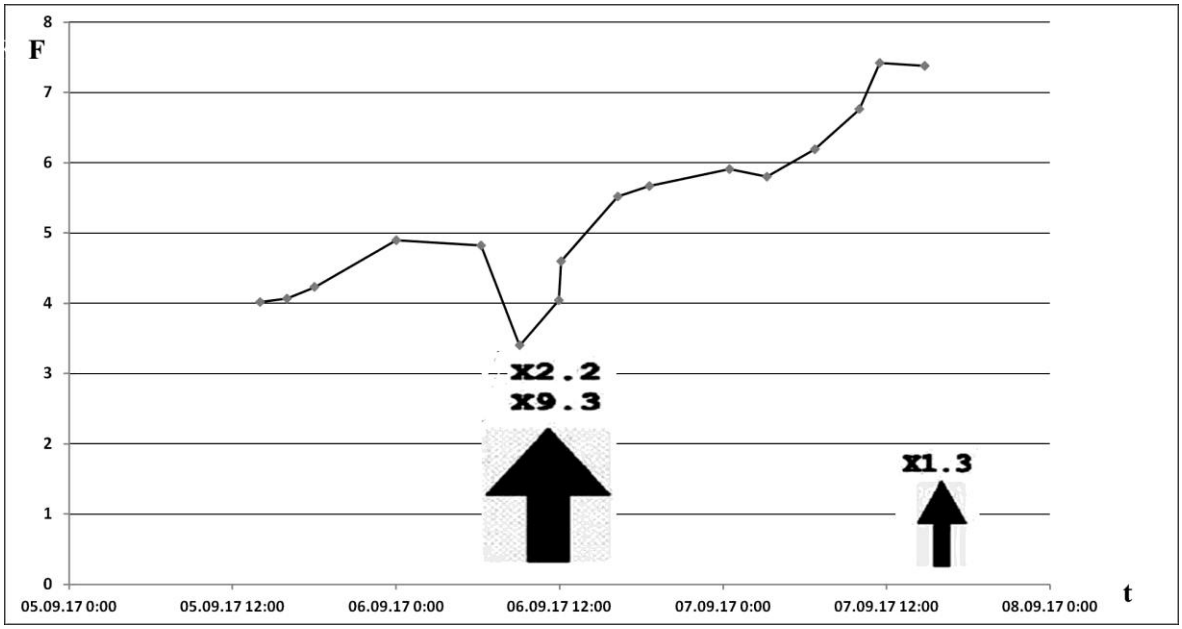


Рис. 1. Временной ход суммарного (без знака, в единицах 10^{22} Мкс) магнитного потока **F** активной области № 12673 в сопоставлении со вспышками балла X.

1. Sun X., Norton A.A.//Res. Notes of the AAS. 2017. V.1. doi: 10.3847/2515-5172/aa9be9.
2. Yang S. et al//Astroph. Journ.Letters. 2017. V.849. L21.
3. Hou Y. J. et al.//Astron. and Astroph.2018. V619.A100.
4. Golovko A.A., Salakhutdinova I.I. // JASTP 2018. V. **179**. P. 120.

РАЗРАБОТКА ДИАГНОСТИКИ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ В КОРОНЕ СОЛНЦА

Кальтман Т.И.[1], Накаряков В.М.[1,2], Ступишин А.Г.[3], Анфиногентов С.А.[4], Лукичева М. В.[1,3,5]

[1]*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия, arles@mail.ru*
[2]*Centre for Fusion, Space and Astrophysics, Physics Department, University of Warwick, UK*
[3]*Санкт-Петербургский Государственный университет, С.-Петербург, Россия*
[4]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*
[5]*Max-Planck-Institut fur Sonnensystemforschung, Gottingen, Germany*

Исследования плазменных струй (plasma jets) в солнечной атмосфере являются активно развивающимся научным направлением исследований как в контексте фундаментальной физики плазмы и плазменной астрофизики, так и в рамках разработки методов прогнозирования космической погоды. Коллимированные лучеобразные структуры регистрируются в рентгеновских и EUV данных наблюдений. Сопутствующие струям явления проявляются в радиодиапазоне. Наблюдение плазменных струйных излучений одновременно в различных диапазонах позволяет детально изучить как их инициирование, энергию, динамику и коллимацию, так и связанные с ними плазменные процессы: неустойчивость, турбулентность и ускорение заряженных частиц.

В докладе дискутируются наблюдательные параметры радиоизлучения в событиях, связанных с плазменными струями, в зависимости от механизма образования, условий излучения и эволюции струй. На основе Каталога горячих струй в короне Солнца представлены наблюдения плазменных струй в различных диапазонах. Основное внимание уделено струям в сильных магнитных полях активных областей. Для некоторых событий, совпадающих по времени с наблюдениями наземных инструментов РАТАН-600, СРГ и Nobeyama RadioHeliograph, представлены соответствующие данные микроволнового диапазона. Данные HMI используются для реконструкции магнитного поля в нижнюю корону и сопоставляются с данными РАТАН-600 и СРГ. Представлена визуализация динамики по данным AIA в разных спектральных линиях.

Разработан метод автоматического поиска струй в однородных временных сериях изображений в крайнем ультрафиолете по данным SDO/AIA. Метод основан на выделении контрастных деталей на изображениях «бегущей разности» (разности интенсивностей EUV-излучения в соседние моменты времени, для SDO/AIA — 12 с). Найденные временные ряды контрастных деталей далее анализируются по ряду параметров (количество пикселей, вытянутость, длина временного ряда), формируются таблицы с указанием параметров предполагаемых струй и видеофайлы с изображениями интенсивности, бегущей разности и предполагаемых струй). Дальнейшей целью применения методики является определение физических механизмов, ответственных за генерацию, коллимацию и динамику плазменных струй в атмосфере Солнца.

Выполнено теоретическое моделирование динамики линейных альвеновских возмущений на плазменных струях. Выведены дисперсионные уравнения, установлены критерии появления эффектов волн с отрицательной энергией и критерии их неустойчивостей.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-29-21016.

Новый каталог синоптических карт и карт корональных дыр на основе данных SDO/AIA 193A

Илларионов Е.А, Косовичев А.Г., Тлатов А.Г.

МГУ, г. Москва, Россия, egor.mypost@gmail.com

Корональные дыры (КД) представляют интерес не только в аспекте задач оперативного прогноза космической погоды, т.е. краткосрочных явлений, но и на существенно больших временных масштабах. В этом случае удобным инструментом становится синоптическая карта. Традиционно для ее построения производится склейка карт корональных дыр, предварительно детектированных на диске Солнца. Возникает, однако, трудность, связанная с изменчивостью контуров КД во времени. Способ решения этой проблемы может существенно влиять результат построения карты. В нашем подходе сначала происходит склейка изображений диска Солнца в синоптическую карту, а затем производится выделение КД. Для выделения контуров мы используем сверточную нейронную сеть, обученную на дисковых изображениях. Замечательным образом алгоритм оказывается применим к синоптическим картам без дополнительной адаптации, что подчеркивает его универсальный характер. Собранный архив синоптических карт и карт корональных дыр за 2010—2020 г. доступен в FITS и JPEG форматах на сайте https://sun.njit.edu/coronal_holes.

Для изучения физических свойств собранных карт КД мы провели сопоставление с синоптическими картами магнитных полей. В качестве примера, на рисунке 1 представлена широтно-временная диаграмма магнитный полей внутри КД и усредненных вдоль широты.

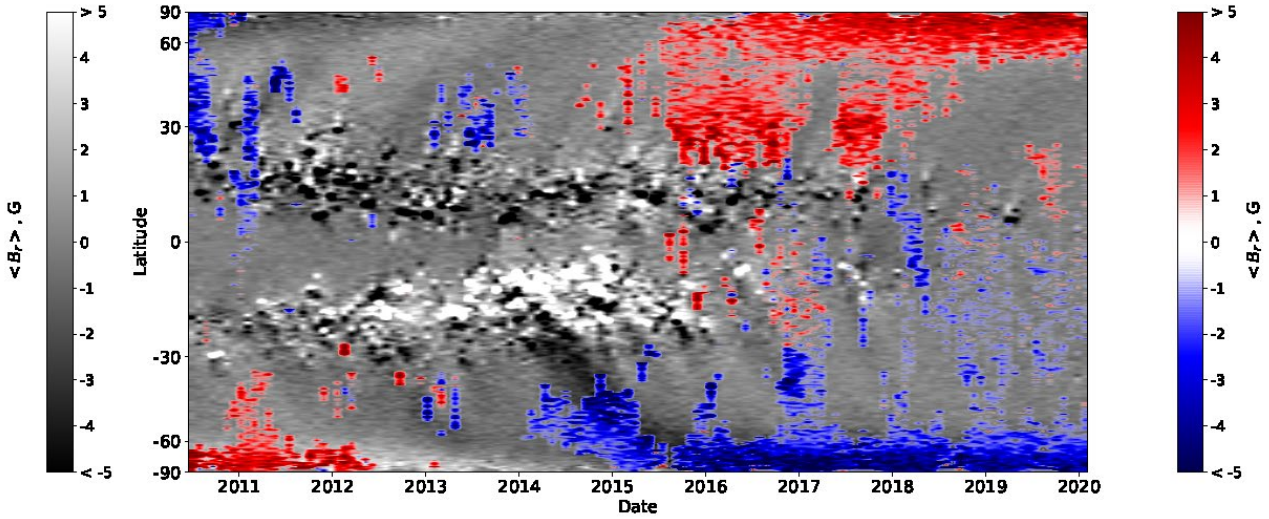


Рисунок 1. Широтно-временная диаграмма магнитного поля внутри КД (синие и красные области) и магнитного поля, усредненного по всем долготам (серый фон).

Сопоставление двух карт, КД и магнитных полей, позволяет проследить формирование КД на высоких широтах магнитным потоком, мигрирующим с низких и средних широт (остатками магнитного потока активных областей). В то же время, можно видеть, что данный сценарий не является единственным.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ (грант № 20-72-00106).

ДИАГНОСТИКА РАДИАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ ПЛАЗМЫ В ОСНОВАНИИ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ МЕДЛЕННЫМИ МАГНИТОЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ

Накаряков, В.М. [1,2]

[1]*СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия,* vnakariakov@googlemail.com
[2]*University of Warwick, Coventry, UK*

Медленные магнитозвуковые волны наблюдаются в короне Солнца как периодические возмущения интенсивности КУФ излучения, бегущие вдоль предполагаемого направления магнитного поля. В неподвижной среде фазовая скорость волн данного типа определяется, в основном, температурой излучающей плазмы. Анализ радиально распространяющихся периодических возмущений интенсивности, наблюдаемых на высотах 1.02-1.23 радиуса Солнца в перьевых плазменных структурах в полярных корональных дырах в КУФ каналах инструмента SDO/AIA, позволяет интерпретировать их как ускоряющиеся с высотой бегущие возмущения концентрации плазмы, вызванные медленными магнитозвуковыми волнами. Бегущие возмущения являются квазипериодическими, с пиками спектральной мощности в районе 5-9 минут. Наблюдаемая скорость бегущих возмущений увеличивается примерно с 111 км/с до 161 км/с, что позволяет оценить радиальное ускорение как 183±12 м/с^2. Оценивая адиабатическую скорость звука в перьевых структурах как постоянную, около 91 км/с, и принимая данное значение за скорость медленных волн в неподвижной среде, мы можем связать наблюдаемое ускорение с радиальными квазистационарными течениями плазмы, питающими солнечный ветер. Скорость данных течений растет с высотой и достигает величины в несколько десятков км/с на высоте 1.23 радиуса Солнца. Альтернативные интерпретации наблюдаемого эффекта могут быть основаны на эффекте конечной величины параметра β и тепловом дисбалансе в плазме короны.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-29-21016.

ДИАГНОСТИКА СВОЙСТВ ФУНКЦИИ НАГРЕВА КОРОНЫ СОЛНЦА С ПОМОЩЬЮ НОВОГО СЕЙСМОЛОГИЧЕСКОГО МЕТОДА

Колотков Д.Ю.[1,2], **Накаряков В.М.**[3,2], **Дакенфилд Т.**[2]

[1]*Институт Солнечно-Земной Физики, СО РАН, г. Иркутск, Россия,*
D.Kolotkov.1@warwick.ac.uk
[2]*University of Warwick, Coventry, UK*
[3]*СПбФ САО РАН, г. Санкт Петербург, Россия*

Для существования горячей короны Солнца требуется непрерывный нагрев, компенсирующий потери энергии на оптически тонкое излучение и продольную теплопроводность в более холодную хромосферу. Природа механизма нагрева солнечной короны остается одной из главных загадок в современной физике Солнца.

В данном докладе мы представляем новый подход для определения свойств функции нагрева короны, основанный на комбинации прямых наблюдений короны и теории возмущения теплового равновесия. Показано, что тонкий корональный тепловой баланс может быть легко нарушен любыми сжимающими возмущениями, например, магнитозвуковыми волнами, регулярно наблюдаемыми в короне. Такие возмущения теплового равновесия вызывают обратную реакцию, приводя либо к потере энергии волны, либо к получению энергии от источника нагрева, таким образом являясь новым естественным механизмом обмена энергии между магнитозвуковыми волнами и плазмой короны. В режиме, когда волна получает дополнительную энергию от источника нагрева, корональная плазма является активной средой для волны. Это может приводить к развитию тепловых неустойчивостей в короне: быстрой конденсации плазмы, связанной с неустойчивостью энтропийной моды (формируя протуберанцы или корональный дождь), и/или усилению амплитуды медленной магнитозвуковой моды. В линейном режиме характерные временные масштабы этих неустойчивостей составляют около нескольких минут в широком диапазоне типичных условий солнечной короны. Данные времена характеризуют, насколько быстро корона восстанавливает свое тепловое равновесие или становится термодинамически неустойчивой в зависимости, в частности, от конкретного выбора функции нагрева.

С использованием разработанного подхода эмпирически получены параметры функции нагрева, необходимые для наблюдаемой долгоживущей и термодинамически стабильной короны, в присутствии наблюдаемых волновых возмущений [1]. Проведена оценка возможности существования стабильной короны для Rosner-Tucker-Vaiana моделей нагрева. Продемонстрировано, что для достаточно сильных магнитных полей (выше 10 Гс в спокойной короне и 100 Гс в горячей и плотной плазме активных областей, так называемое «приближение бесконечного поля») выбор зависимости корональной функции нагрева от магнитного поля не влияет на динамику медленных магнитозвуковых волн [2].

1. Kolotkov, D. Y., et al. // Astron. Astrophys. 2020. V. **644**, P. A33.
2. Duckenfield, T. J., et al. // Astron. Astrophys. 2021 (in press, eprint arXiv:2011.10437).

ПРОБЛЕМА НАГРЕВА СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ И МИКРОВОЛНОВОЕ ЦИКЛОТРОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Флейшман Г.Д., Анфиногентов С.А., Ступишин А.Г., Кузнецов А.А., Nita G.M.

New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA, gfleishm@njit.edu

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Внешняя область атмосферы Солнца, солнечная корона, гораздо горячее (1 МК и выше), чем видимая поверхность Солнца, фотосфера (6000 К). Почему это происходит и благодаря каким физическим механизмам корона нагревается до миллионов градусов остается одним из крупнейших нерешенных вопросов в физике Солнца и звезд. Визуальное сравнение изображений Солнца в вакуумном ультрафиолетовом диапазоне длин волн с фотосферными магнитограммами показывает, что яркость активных областей, где концентрируются сильные магнитные поля, заметно выше, чем областей спокойного Солнца. Это взаимосвязь указывает на важную роль магнитного энерговыделения в нагреве короны. Поэтому большинство теорий нагрева короны опираются на тесную связь между структурой коронального магнитного поля и тепловой плазмой. Эта связь основывается на двух фактах: (1) магнитное поле – это основной источник энегии в короне и (2) перенос тепла в основном происходит вдоль магнитного поля, тогда как перенос тепла поперек поля сильно подавлен.

Тем не менее, еще не установлены ни точный физический механизм коронального нагрева, ни феноменологические взаимосвязи между свойствами поля (такими как напряженность, закрутка и т.п.) и тепловой плазмой в короне. В значительной степени это происходит потому, что основная информация о нагреве короны получается из наблюдений вакуумного ультрафиолетового или мягкого рентгеновского излучений, которые не зависят явным образом от магнитного поля.

В представляемом докладе обсуждается альтернативный, пока еще практически не исследованный подход, использующий тепловое радиоизлучение короны. Основные преимущества радиоизлучения для исследования нагрева короны следующие: (1) радиоизлучение непосредственно чувствительно к магнитному полю; (2) оно может быть как оптически толстым, так и тонким; (3) не зависит от элементного состава плазмы. В общем случае для получения полной картины нагрева короны нужны наблюдения на многих радио частотах.

В данном сообщении, в качестве примера, рассматриваются радио данные только на двух частотах: 5.7 ГГц (CCPT) и 17 ГГц (NoRH), с упором на циклотронное излучение на 17 ГГц [1]. Мы выбрали подходящую для данного исследования активную область 11520, которая содержит несколько пространственно разделенных оптически толстых и тонких циклотронных источников. Мы реконструировали корональное магнитное поле потенциальным и бессиловыми методами и заполнили полученные магнитные кубы тепловой плазмой в соответствие с развитой нами методологии параметрического нагрева короны. Затем мы синтезировали радио карты с помощью пакета GX Simulator для различных значений параметров, описывающих параметрический нагрев короны. Эти синтезированные карты сворачивались с диаграммой направленности NoRH и количественно (попиксельно) сравнивались с картой, полученной из наблюдений NoRH. Это исследование ярко демонстрирует исключительно высокую чувствительность циклотронного радиоилучения к деталям коронального нагрева и, как следствие, дает очень жесткие ограничения на его возможные механизмы, которые невозможно было бы получить традиционными методами без использования радио данных.

1. Fleishman G.D., Anfinogentov S.A., Stupishin A.G., Kuznetsov A.A., Nita G.M. // Astrophys. J. 2021. In press.

НАБЛЮДЕНИЯ В ЛИНИИ НЕ 1083 NM НА ТЕЛЕСКОПЕ БСТ-2 КРАО В 1999-2018 ГГ

Андреева О.А., Малащук В.М.

КрАО РАН, Научный, Крым, Россия, olga@craocrimea.ru

Линия He I 1083.0 нм (HeI) - наиболее сильная триплетная линия нейтрального гелия, позволяющая исследовать физические свойства верхней хромосферы и переходного слоя между хромосферой и короной. Именно в этой линии, которая образуется в верхней хромосфере на высоте около 2000-3000 км и возбуждается ультрафиолетовым излучением, возможно наблюдать корональные дыры (КД) с Земли. Эта линия — линия поглощения; в КД она становится слабее, и это приводит к тому, что излучение в ней по сравнению с соседними частями короны оказывается выше. КД в линии HeI более яркие, чем окружающая корона.

В 80-х годах прошлого столетия в “Крымской астрофизической обсерватории” под руководством Н.Н. Степанян были начаты работы по подготовке технических возможностей и программного обеспечения для наблюдений в линии HeI. Была разработана система проведения наблюдений и обработки изображений. Организован ежедневный мониторинг и оперативное представление данных наблюдений в INTERNET, созданы обширные базы данных. Это позволило КрАО участвовать в национальных и международных программах наблюдений "Служба Солнца", "SpaceWeather" и других. Наблюдения в линии HeI в КрАО проводятся на башенном солнечном телескопе БСТ-2 с дифракционным спектрографом и Универсальным спектрофотометром (УСФ) (Степанян и др., 2000). С помощью УСФ можно получать изображения всего Солнца, или отдельных участков диска. В качестве приемного устройства на выходе спектрографа используется фотоумножитель ФЭУ-83 или ПЗС-камера. Достаточно высокая чувствительность этих приемников позволяет применять УСФ для исследования Солнца в близкой инфракрасной области, в частности, в линии HeI. Сервисные программы позволяют в течение нескольких минут учесть потемнение к краю и проанализировать изображение для выявления КД. На Рис. 1. Изображение Солнца в линии HeI, полученное на телескопе БСТ-2. Слева необработанное изображение, справа - с учетом потемнения к краю.

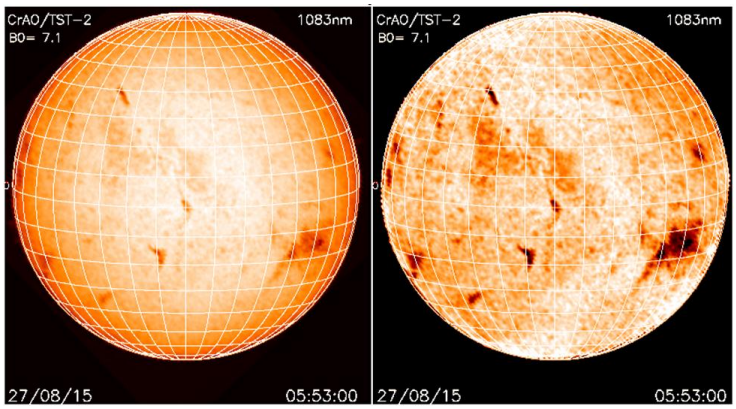


Рис. 1. Изображения Солнца в линии He 1083.0 nm

Наблюдения в линии HeI проводятся регулярно с 1999 года по настоящий момент. В 2020 году выполнена модернизация процесса наблюдений. В данное время формируется каталог изображений диска Солнца, полученных на телескопе БСТ-2 в 1999-2018гг., до модернизации. Фрагменты каталога и его описание будут представлены в докладе.

1. Степанян Н.Н. и др. // Изв. Крымск.астрофиз. обсерв., 2000. Т.96 С. 194.

SLOW MHD WAVES ABOVE SUNSPOTS AS A PROXY OF MAGNETIC HELICITY

Sergey Anfinogentov, Kirill Kuzanyan and Shangbin Yang

ISTP, Irkutsk, Russia,
IZMIRAN, Moscow, Russia, kuzanyan@izmiran.ru
NAOC, Key Lab for Solar Activity, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

Трёхминутные колебания наблюдаются в атмосфере практически каждого солнечного пятна. Современные наблюдательные инструменты позволяют отслеживать их динамику на разных уровнях солнечной атмосферы от температурного минимума и хромосферы до горячей корональной плазмы, видимой в линиях крайнего ультрафиолетового (КУФ) диапазона. Данные колебания представляют собой магнито-акусто-гравитационные (МАГ) волны, которые распространяются вдоль силовых линий из нижних уровней солнечной атмосферы в корону. В условиях сильного магнитного поля атмосферы тени пятна, магнитное давление преобладает над газодинамическим, и распространение МАГ волн происходит вдоль силовых линий магнитного поля. В зоне температурного минимума МАГ волны подвержены сильной дисперсии, которая характеризуется частотой акустической отсечки. Период отсечки составляет 2.5 – 3 минут для вертикального распространения волн и может быть заметно длиннее (до 10 мин и более), если силовые линии магнитного поля наклонены. Таким образом частота отсечки может быть измерена из наблюдений и несёт информацию о наклоне магнитного поля в зоне температурного минимума и хромосферы, а следовательно может быть использована для измерения этого параметра [1]. Помимо частоты отсечки сейсмологическую информацию о геометрии магнитного поля и расстоянию между различными слоями несут задержки и пространственные смещения МАГ волн, возникающие при их распространении между слоями солнечной атмосферы, наблюдаемыми в разных спектральных каналах. Измеренные задержки позволяют измерить фазовую скорость МАГ волн в предположении модельных высот формирования спектральных линий [2]; [3] или оценить высотное расстояние между излучающими слоями, предполагая, что волна распространяется со средней скоростью звука [4]. Упомянутые исследования выявили несоответствие между измеренной фазовой скоростью и характерными значениями скорости звука в хромосфере. Причина этого несоответствия может состоять как в отличии реальных высот формирования спектральных линий от модельных, так и в отсутствии учёта дисперсии при сравнении фазовой скорости и ожидаемой скорости звука. Дополнительный учёт пространственных смещений (проекции пути распространения МАГ волны на картинную плоскость), и угла наклона магнитного поля (по экстраполяции или по частоте отсечки) позволяет независимо измерить как высотное расстояние между слоями формирования излучения в разных спектральных линиях и фазовую скорость распространения волны [5]. Кроме того, наблюдаемые смещения МАГ волн определяют азимутальный угол ориентации магнитного поля. Пространственное распределение данного угла даёт возможность диагностировать наличие закрутки магнитного поля на уровне температурного минимума-хромосферы пятна.

1. D. Yuan, R. Sych, V. E. Reznikova, and V. M. Nakariakov, “Multi-height observations of magnetoacoustic cut-off frequency in a sunspot atmosphere,” Astr.Astrophys. v. 561, id.A19, 2012.
2. N. I. Kobanov, A. A. Chelpanov, and D. Y. Kolobov, “Oscillations above sunspots from the temperature minimum to the corona,” Astron. Astrophys. Vol. 554, id.A146, 6 pp., May 2013.
3. V. E. Reznikova, K. Shibasaki, R. A. Sych, and V. M. Nakariakov, “Three-minute oscillations above sunspot umbra observed with SDO/AIA and NoRH,” Astrophys. Journal, Vol. 746, Issue 2, id. 119, 10 pp. (2012)., Sep. 2011.
4. A. S. Deres and S. A. Anfinogentov, “Measurement of the formation heights of UV and EUV emission above sunspot umbrae from observations of three-minute oscillations,” Astron. Reports, vol. 59, no. 10, 2015.
5. A. Deres and S. Anfinogentov, “Probing the Sunspot Atmosphere with Three-Minute Oscillations,” Sol. Phys., vol. 293, no. 1, 2018.

ПОЛЯРНОСТЬ СЛАБЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА

Вернова Е.С.[1], Тясто М.И.[1], Баранов Д.Г.[2]

[1]*СПб филиал ИЗМИРАН, г. С.-Петербург, Россия, elenavernova96@gmail.com*
[2]*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. С.-Петербург, Россия, d.baranov @bk.ru*

Исследованы свойства магнитных полей фотосферы Солнца, в частности, распределение полей разной полярности по солнечной поверхности. В качестве исходных данных использовались синоптические карты фотосферного магнитного поля Национальной Солнечной Обсерватории Китт Пик за 1978-2016 гг. С помощью метода векторного суммирования выделена неосесимметричная компонента магнитного поля. Обнаружены особенности неосесимметричной компоненты слабых магнитных полей, которая изменяется в противофазе с потоком этих полей. Магнитные поля B<5 Гс составляют существенную часть общего магнитного поля Солнца, так как они занимают более 60% площади фотосферы.

На диаграмме широта-время для слабых магнитных полей (B<5 Гс) ярко проявляется во всех четырех циклах чередование полос с доминированием одной из полярностей - положительной или отрицательной. Наклон полос говорит о смещении полей определенной полярности по направлению к полюсам. Наблюдаются полосы двух типов. Полосы первой группы, по-видимому, относятся к так называемым Rush-to-the-Poles. Это полосы с шириной порядка трех лет, которые начинаются приблизительно на 40° и имеют ту же полярность, что и хвостовые пятна. Они доходят до высоких широт и вызывают переполюсовку полярного поля. Однако, кроме этих полос, для большей части цикла (спад активности, минимум и подъем активности) существуют более узкие полосы обеих полярностей (с шириной меньше одного года), которые от экватора доходят почти до полюса. Наблюдается большое разнообразие этих полос, которые наиболее отчетливо видны в южном полушарии в тех случаях, когда южный полюс имеет положительную полярность. Получены оценки ширины полос разных полярностей и периодичности их проявления в разных циклах солнечной активности.

ГЛУБИННОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ СОЛНЦА

Гаврюсева Е.А.

ИЯИ РАН, г. Москва, Россия, elena.gavryuseva@gmail.com

Анализ структуры фотосферных магнитных полей, вращения и их временные вариации позволили установить

- существование устойчивой долготной структуры магнитного поля,
- определить ее геометрическую структуру,
- установить на какой глубине она формируется,
- как долго существует,
- когда наиболее явно проявляется и
- с какой скоростью вращается.

1. Gavryuseva E.A. // 2018. arXiv:1802.02450 astro-ph.SR.
2. Gavryuseva E.A. // 2018. arXiv:1802.02692 astro-ph.SR.
3. Gavryuseva E.A. // 2018. arXiv:1802.02461 astro-ph.SR.

АНАЛИЗ ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ КОРОНАЛЬНОЙ ДЫРЫ НА СОЛНЦЕ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Голубчина О.А.

СПб Ф САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, golubchina_olga@mail.ru

В докладе представлен обзор результатов исследования полярной корональной дыры над Северным полюсом Солнца по наблюдениям на радиотелескопах БПР, РАТАН - 600, РТ- 22 (КРАО), NoRH и других радиотелескопах с использованием данных (EUV SOHO/EIT) [1 - 4].

Наблюдение солнечного затмения 29.03.2006 г на РАТАН – 600 позволило впервые определить распределение яркостных температур над Северным полюсом Солнца в пределах полярной корональной дыры на Солнце в широком диапазоне сантиметровых длин волн (λ = 1.03, 1.38, 2.7, 6.2, 13.0, 30.7 см) на интервале расстояний (1.005-2.0) Rc от центра оптического диска Солнца (Rc – радиус оптического диска Солнца). Анализ этих полученных результатов на сантиметровых длинах волн с привлечением опубликованных данных (1974-2016 гг.) других авторов подтвердил резкое уменьшение яркостных температур радиоизлучения полярной корональной дыры вблизи солнечного лимба на $\lambda > 6$ см; отсутствие видимости полярной корональной дыры на коротких сантиметровых длинах волн (1.03, 1.38, 2.7 см); идентичность температурных свойств полярной КД и низкоширотных КД независимо от их расположения на Солнце и, следовательно, от их организации в период минимума солнечной активности; найденное распределение электронной плотности с расстоянием от лимба Солнца до двух радиусов Солнца в пределах полярной корональной дыры согласуется с результатами наблюдений в белом свете.

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН в части "Проведение Фундаментальных Научных Исследований".

1. Borovik V.N.// Lect. Notes Phys. 1994.V. **432**. P.185.
2. Golubchina O.A., Korzhavin A.N., Tokhchukova S. // Astrophys. Bull. 2011.V. **66**. No. 4. P. 488 .
3. Bachurin A.F., Eriushev N.N., Tsvetkov L.I. // Izv. Krymsk. Astrofis. Obs.1974. V. **52.** P. 180.
4. Gopalswamy N., Shibasaki K., Thompson B. J., DeForest C. // Geophysical Research. 1999. V. **104**. A5. P. 9767.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ТЕКУЩЕГО 25 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: ПЕРВЫЙ ГОД РАЗВИТИЯ

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия, ishkov@izmiran.ru

В январе 2020 г. сглаженное относительное число солнечных пятен впервые показало рост после максимума 24 солнечного цикла в апреле 2014 г., открыв тем самым очередной 25 цикл солнечной активности – второй солнечный цикл, опять же, второй эпохи пониженной солнечной активности на достоверном ряде относительного числа солнечных пятен. Текущий 25 солнечный цикл начался с рекордно низкого значения W*=1.3 (1.8 в новой системе), но уже в конце ноября 2020 г. (11 мес. развития) на видимый диск Солнца в Южном полушарии вышла первая большая группа пятен (Sp мах ~1000 мдп). Первые признаки её появления и локализации на обратной стороне Солнца поступили от сети гелиосейсмологической службы GONG 14.11, что позволило дать прогноз её выхода на видимый диск Солнца 23.11. Активная область была спокойной с простой биполярной магнитной конфигурацией и, соответственно, с низкой вспышечной активностью – всего 10 вспышек рентгеновского класса "C".

Со времени появления первой группы солнечных пятен с порядком полярности текущего 25 солнечного цикла (август 2017 г.) и до формального начала цикла асимметрии пятнообразовательной деятельности по полушариям практически не было. Однако с началом значимой пятнообразовательной активности (октябрь 2020 г.) активные области южного полушария стали преобладать (17 против 3 на 31.12.2020). Это же относится и к появлению солнечных волокон. Кривая динамики сглаженных чисел Вольфа значимо отошла от кривой роста прошедшего 24 солнечного цикла и качественно вошла в область характерную для средних СЦ, что и не удивительно, т.к. по правилу Гневышева-Оля, несомненно работающему на достоверном ряде солнечных циклов внутри эпох солнечной активности, текущий 25 цикл должен быть средней величины. В эпохи пониженной солнечной активности исключаются высокие циклы.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ СОЛНЕЧНОЙ ПОСТОЯННОЙ С ЧИСЛАМИ ВОЛЬФА ДЛЯ РАЗНЫХ ЦИКЛОВ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА.

Лаптухов А.И., Лаптухов В.А.

ИЗМИРАН г. Москва, Россия, a.laptukhov@mail.ru

Установлена статистическая нелинейная немонотонная зависимость среднесуточных величин солнечной «постоянной» от суточных чисел Вольфа. Предложен физический механизм этой нелинейной зависимости, в основе которой лежит учёт всплытия магнитных облаков из горячих недр Солнца и пониженной температуры внутри солнечного пятна. Показано, что поток излучения Солнца для 11-летних циклов с высокой и низкой активностью существенно разный и, кроме того, он выше на фазе роста, чем на фазе спада цикла. Эти особенности надо учитывать при восстановлении солнечной постоянной на основе суточных чисел Вольфа.

Статистически средняя зависимость солнечной постоянной S от чисел Вольфа W на основе данных за 1976-2018 гг. имеет следующие характеристики: при росте чисел Вольфа от 0 до 180-190 статистически средняя величина солнечной постоянной $S(W)$ увеличивается от $S(W=0)$=1360.434±0.004 до S_{max}=1361.37±0.03 Вт/м^2, а при дальнейшем росте чисел Вольфа до максимальных значений W~400 величина солнечной постоянной уменьшается от максимальной величины S_{max} до 1360.34±0.22 Вт/м^2, которая близка к $S(W=0)$. Показано, что величина потока солнечной энергии S на фазе роста солнечного цикла выше, чем на фазе спада в среднем за 1976-2018 гг. на величину $\Delta S \cong 0.2$ Вт/м^2.

Замечание. Эти результаты получены на основе анализа новых, существенно скорректированных в июле 2015 г. данных суточных чисел Вольфа и уточнённого ряда среднесуточных значений солнечной постоянной. Они качественно согласуются с некоторыми результатами, полученными в работе [1] на основе анализа данных солнечной постоянной и чисел Вольфа за 1976-2010 гг, но есть и заметные количественные различия.

1.- Лаптухов А.И., Лаптухов В.А.// Инженерная физика. 2012, № 5. С. 50-59.

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ИСТОЧНИКА ПОЛЯРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА В МИНИМУМЕ 2008 ГОДА

Мерзляков В.Л., Баранов Д.Г., Вернова Е.С.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, mvl@izmiran.ru

Проведён сравнительный анализ свойств источника полярного магнитного поля Солнца в минимумах солнечной активности 1986 г., 1996 г. и 2008 г. Анализировались геометрические параметры полярных перьев и фотосферные магнитные поля. Геометрия полярных перьев изучалась по структурам солнечных корон, наблюдаемых во время полных затмений Солнца. Фотосферные магнитные поля изучались по синоптическим магнитным картам обсерватории Kitt Peak.

Было установлено, что в минимумах 1986 г. и 1996 г. изучаемый источник имеет свойства магнитного «заряда», находящегося на удалении 0.67 ± 0.2 R_{sun} (в радиусах Солнца) от центра Солнца. Эти свойства источник имеет на спаде и росте солнечной активности в интервале фазы солнечного цикла -0.2 – +0.2. В минимуме 2008 г. конфигурация полярных перьев показывает, что «заряд» расположен на 0.65 R_{sun}, а по данным фотосферных магнитных полей этот «заряд» должен находиться на расстоянии 0.55 R_{sun}. Такое различие в положении «заряда» означает, что полярный источник изменил свою структуру по сравнению с минимумами 1986 г. и 1996 г. Изменения могут касаться зависимости напряженности с расстоянием r^{-n} ($n \neq 2$) или/и геометрии магнитных силовых линий, кривизна которых с удалением от полюса увеличивается. В случае изменения только напряженности с расстоянием показатель степени испытывает вариацию от n = 1.4 при фазе цикла -0.2 до n = 0.9 при фазе цикла +0.2.

Частотные характеристики амплитудно-временной динамики вариаций числа солнечных пятен 11-летнего солнечного цикла (17-24 циклы солнечной активности).

Морозова Е.И., Безродных И.П. , Петрукович А.А.

ИКИ РАН, morozova.evgeniya2014@yandex.ru

В работе проведен анализ амплитудно-временной динамики вариаций числа солнечных пятен (SSN) для четырех частотных (частота в единицах 1/сут.) диапазонов: f1= 0.009-0.005; f2= 0.005-0.002; f3= 0.002-0.0015; f4= 0.0015-0.0011. Вариации f1 (период 0.304-0.54г.) и f2 (период 0.54-1.37 г.) относятся к Rieger-type вариаций (Rieger-type, периоды <1года). Вариации f3(период 1.37-1.83 г.) и f4(период 1.83 -2.5 г.) относятся к квази-биенальным вариациям (quasi-biennial-QBO, периоды ~ 1-3 г.). Вариации в выделенном частотном диапазоне получаются при вычитании двух отфильтрованных (сглаженных) суточных величин SSN. Например, диапазон f1= 0.009-0.005 1/сут. выделяется фильтрами Ф1=0.00-0.009 1/сут. и Ф2=0.00-0.005 1/сут. Для всех циклов вычислены коэффициенты корреляции между вариациями амплитуды в выделенном частотном диапазоне и величиной сглаженной соответствующим фильтром амплитуды SSN. Получены сле дующие результаты.

1.Частотный диапазон f1 и f2. Внутри циклов амплитуда частотных вариаций изменяется, от максимальных значений вблизи максимума на фазе возрастания числа SSN (иногда на фазе возрастания или спада SSN) до минимальных величин вблизи минимумов интенсивности SSN. Нет прямой функциональной зависимости амплитуды частотных вариаций от динамики числа SSN как внутри цикла, так и между циклами. Амплитуда частотных вариаций внутри циклов модулируется 11-летними вариациями числа SSN. Для 8 циклов коэффициенты корреляции между амплитудой частотных вариаций и числом SSN варьируются от 0.63 до 0.35. Для диапазона f1в течение 1932-2020 г. регистрируются периодические вариации амплитуды с периодами 156 и 158 дней, для диапазона f2 с периодами 320 и 396 дней (для вычисления спектров мощности использованы суточные значений амплитуды вариаций).

2.Частотный диапазон f3 и f4. В 17-20 циклах амплитуда частотных вариаций модулируется 11-летними вариациями числа SSN, но коэффициенты корреляции между амплитудой частотных вариаций и числом SSN достаточно низкие <0.35. После 20 цикла в 21-24 циклах значительно меняется динамика амплитуды частотных вариаций, 11-летняя модуляция, в основном, проявляется в виде двух разделенных максимумов амплитуды вблизи двух максимумов SSN и минимума при минимуме SSN, на фазе возрастания и спада SSN амплитуды вариаций малы. Частотные характеристики амплитуды вариаций значительно различаются между 17-20 и 21-24 циклами: в 17-20 циклах можно выделить квазипериодические вариации с периодами ~ 1.2-1.5 г., в 21-24 циклах амплитуды вариаций изменяются хаотично. Для диапазона f3 в спектрах мощности амплитуды вариаций пиковые значения мощности регистрируются для периодов 1.25 г., 1.33 г., 1.52 г. и 1.8 г., для диапазона f4 пиковые значения мощности ─ для периодов 2.3 г., 2.5 г. и 3.2 г.

3.Эффект Гневышева (Gnevyshev Gap –GG). Эффект Гневышева (ЭГ) проявляется в динамике SSN внутри цикла в виде двух максимумов интенсивности SSN (M1 и M2 - сдвоенные максимумы) вблизи максимума цикла, разделенных по времени ~ 1-3 г. Сдвоенные максимумы проявляются в динамике сглаженных величин SSN для всех 8 циклов, при этом для 17-22 циклов M1>M2, для 23 и 24 циклов M2>M1. В динамике амплитуды частотных вариаций ЭГ проявляется по- разному в разных частотных диапазонах. Для диапазона частот f1 и f2 для 17-20 циклов на фоне значительной 11-летней модуляции трудно выделить вариации, вызванные ЭГ. Для диапазона частот f3 и f4 для 17-20 циклов и для диапазона частот f1 и f2 для 21-24 циклов возможно с влиянием ЭГ связано изменение фазы модуляции амплитуды вариаций после минимума SSN между двумя максимума. Для диапазона частот f3 и f4 для 21-24 циклов ЭГ проявляется как квазипериодические вариации амплитуды вблизи максимумов SSN с периодами ~1.5-2.5 г.

РОТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛЯРНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Смирнова В.В.[1], Риехокайнен А.[2], Соловьев А.А.[3]

[1]*КрАО РАН, пгт. Научный, Республика Крым, Россия, vvsvid.smirnova@yandex.ru*

[2]*Университет Турку, г. Турку, Финляндия*

[3]*ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия*

В последнее время, основные исследования корональных дыр (КД) направлены на моделирование их физических параметров с целью изучения процессов, приводящих к появлению ускоренного солнечного ветра. В меньшей степени затрагивается анализ временных вариаций КД и их ротационных свойств, в пределах одного солнечного цикла, что крайне необходимо для построения адекватных теоретических моделей КД.

В настоящей работе проводится исследование вариаций площадей полярных КД, с периодами 8-9, 13-15 и 26-29 дней. Границы площадей КД идентифицировались двумя методами: 1. «Coronal Hole Identification via Multi-thermal Emission Recognition Algorithm (CHIMERA)», выделяющий КД на основе трех ультрафиолетовых линий 171, 193 и 211 Å [1]; 2. Сегментации КД с помощью нейронной сети, на основе ультрафиолетовой линии 193 Å [2]. Карты распределения интенсивности в линиях были получены с помощью инструмента Atmospheric Imaging Assembly (AIA), установленном на космическом аппарате Solar Dynamics Observatory (SDO).

В результате анализа данных, были выявлены периоды временных вариаций площадей полярных корональных дыр в интервалах 26-29, 13-15 и 8-9 дней, причем период 8-9 дней имел очень низкую амплитуду, в сравнении с другими периодами.

Исследования секторной структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца, проведенные в работах [3, 4] показали, что синодические периоды вращения крупномасштабных структур магнитного поля составляют 26-30, 13-14, и 8-10 дней, для двух-, четырех, и шестисекторной структуры общего магнитного поля Солнца, соответственно.

Исходя из результатов анализа вариаций площадей полярных КД, а также, из результатов работ [3, 4], был сделан вывод, что периоды 13-15 и 8-9 дней, могут являться проявлением секторной структуры общего магнитного поля Солнца.

Другое объяснение периода 13-15 дней, обнаруженного в вариациях площадей полярных КД, может быть связано с проявлением ротационного эффекта, когда магнитная ось наклонена относительно оси вращения Солнца. В таком случае, проявление долготной асимметрии КД также может являться следствием изменения угла наклона магнитной оси относительно оси вращения Солнца.

В работе [5] было показано, что период вращения ядра Солнца составляет 7-9 дней. С учетом этого результата можно предположить, что обнаруженный в нашей работе период 8-9 дней для полярных корональных дыр, возможно, модулирован вращением солнечного ядра.

1. Garton T.M., Gallagher P.T., Murray S.A. // JSWSC 2018. V. 8. ID. A02.
2. Illarionov E.A., Tlatov A. G. // MNRAS 2018. V. 481. Iss. 4. P. 5014.
3. Obridko V.N., Shelting B.D. // Sol.Phys. 1999. V. 187. P. 185.
4. Васильева В.В., Макаров В.И., Тлатов А.Г. // Труды ССЗФ-2003 2003. с. 59.
5. Fossat E., Boumier P., Corbard T. et al. // A&A 2017. V. 604. ID. A40.

ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДА К НОВОМУ РЕЖИМУ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Старкова Л.И.

ИЗМИРАН РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, starkova@izmiran.ru

Изучается проблема пониженной генерации магнитного поля Солнца, которая произошла на спаде 23 солнечного цикла. С этой целью был проведён анализ конфигурации коронального магнитного поля Солнца в минимуме 23 – 24 солнечных циклов. Обнаружено, что геометрические параметры корональных шлемов, которые отражают корональную магнитную конфигурацию, существенно отличаются от ситуации в XX веке. Кроме того, проведена оценка амплитуды 24 солнечного цикла по числу Вольфа. Для оценки была использована закономерность предшествующих циклов между напряженностью полярного магнитного поля в минимуме солнечной активности и последующим максимумом числа Вольфа. Получена оценка величины максимума 24 солнечного цикла 118.8 числа Вольфа, которая отличается незначительно ≈2% от наблюдаемой величины. Установленные особенности могут быть интерпретированы как переход к новому режиму, который привёл к пониженной мощности генерации магнитного поля. При этом переходе изменились условия генерации полоидальной компоненты магнитного поля в минимуме 23 – 24 солнечных циклов. А условия генерации тороидальной компоненты остались такими, какими они были в XX веке.

ПРОСТЕЙШЕЕ ЛИНЕЙНОЕ ДИНАМО СОЛНЦА И НОВЫЙ МЕХАНИЗМ НЕЛИНЕЙНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Старченко С.В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Калужское шоссе 4, Троицк, Москва, 108840
E-mail: sstarchenko@mail.ru

Векторное произведение скорости течения на магнитное поле **D** – определяющий ингредиент уравнения магнитной индукции. Наиболее общеизвестным примером оценки динамо-эффекта **D** является генерация усредненного тороидального магнитного поля S из полоидального F за счет градиента угловой скорости вращения $\mathbf{\Omega}'$. Простейшая 0-мерная линейная модель: $dS/dt = -\mathbf{\Omega}'F$ если пренебречь магнитной диффузией. Замыкает цикл альфа эффект α на глобальном масштабе L: $dF/dt = \alpha S/L$, который, возможно впервые, определяется здесь параллельной ротору скорости компонентой **D** из силового уравнения Навье-Стокса. Результирующее гармоническое решение, по-видимому, является наипростейшей моделью цикла Солнечной активности. Исходя из гелиосейсмологических данных о $\mathbf{\Omega}'$ и известного 22-летнего периода активности, эта модель дает согласованную с наблюдениями и независимыми исследованиями оценку $\alpha = 0.1$ м/сек и $S/F = 20$.

Параллельная электрическому току компонента **D** из силового уравнения получается обратно пропорциональной усредненному магнитному полю или электрическому току. Это задает новый сингулярный тип нелинейности, который возможно позволит найти эффективное решение актуальных проблем резкого выделения энергии (в Солнечных вспышках, супервспышках на звездах и т.д. и т.п.) и огромной вариативности или перемежаемости магнитных полей во многих натуральных, лабораторных и численных МГД динамо. Последнее проявляется, например, в солнечных пятнах, состоящих из сильно концентрирующихся магнитных жгутов резко выделяющихся по сравнению с окружающими «размазанными» сравнительно слабыми фоновыми полями. Соответствующая нелинейная стабилизация происходит за примерно два характерных времени магнитной диффузии и установившиеся величины поля согласуются с наблюдаемыми полями.

Прогнозирование ряда чисел Вольфа методами машинного обучения

Шибаев А. И.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, alexshibaev@yandex.ru

В работе рассматривается возможность прогнозирования солнечных циклов методами машинного обучения. Для этого привлекается методы на основе деревьев решений: RandomRorestRegressor и XGBoostRegressor с усреднением этих прогнозов. Рассматривается достоверная часть ряда чисел Вольфа без квазидвухлеток (и более высокочастотных компонент), т.е. одновершинные циклы с 10 и далее. Прогноз текущего значения ряда $\boldsymbol{x_i}$ опирается на N предыдущих значений $\boldsymbol{x_{i-N}}, \ldots, \boldsymbol{x_{i-1}}$ и сканируя этот прогнозирующий массив по всему обучающему массиву строится модель процесса. Чтобы алгоритмы улавливали низкочастотные и среднечастотные закономерности ряда чисел Вольфа, длина прогнозирующего массива N выбирается в пределах 6-7 циклов.

Подбор оптимальных параметров моделей.

Основной настраиваемый параметр для RandomForestRegressor – max_features (число признаков для выбора расщепления) . В качестве меры ошибки прогноза цикла использовалась RMSE(корень из среднеквадратичной ошибки). Варьируя max_features и оценивая последовательно ошибку RMSE на отложенных 22, 23 и 24 циклах, было подобрано оптимальное значение параметра, минимизирующую ошибку предсказания на отложенных циклах.

Для XGBoostRegressor подбирались, аналогичным образом, оптимальные значения следующих параметров: n_estimators(число деревьев в алгоритме), max_depth(максимальная глубина дерева), min_samples_leaf(минимальное число объектов в листе(конечная вершина)).

Прогнозирование ряда чисел Вольфа методами машинного обучения

Шибаев А. И.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, alexshibaev@yandex.ru

В работе рассматривается возможность прогнозирования солнечных циклов методами машинного обучения. Для этого привлекается методы на основе деревьев решений: RandomRorestRegressor и XGBoostRegressor с усреднением этих прогнозов. Рассматривается достоверная часть ряда чисел Вольфа без квазидвухлеток (и более высокочастотных компонент), т.е. одновершинные циклы с 10 и далее. Прогноз текущего значения ряда $\boldsymbol{x_i}$ опирается на N предыдущих значений $\boldsymbol{x_{i-N}}, \ldots, \boldsymbol{x_{i-1}}$ и сканируя этот прогнозирующий массив по всему обучающему массиву строится модель процесса. Чтобы алгоритмы улавливали низкочастотные и среднечастотные закономерности ряда чисел Вольфа, длина прогнозирующего массива N выбирается в пределах 6-7 циклов.

Подбор оптимальных параметров моделей.

Основной настраиваемый параметр для RandomForestRegressor – max_features (число признаков для выбора расщепления) . В качестве меры ошибки прогноза цикла использовалась RMSE(корень из среднеквадратичной ошибки). Варьируя max_features и оценивая последовательно ошибку RMSE на отложенных 22, 23 и 24 циклах, было подобрано оптимальное значение параметра, минимизирующую ошибку предсказания на отложенных циклах.

Для XGBoostRegressor подбирались, аналогичным образом, оптимальные значения следующих параметров: n_estimators(число деревьев в алгоритме), max_depth(максимальная глубина дерева), min_samples_leaf(минимальное число объектов в листе(конечная вершина)).

ПРИЧИНЫ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЕРИОДА «ЦИКЛА ГЛЯЙСБЕРГА»

Шибаев И.Г.[1], **Шибаев А.И.**[2]

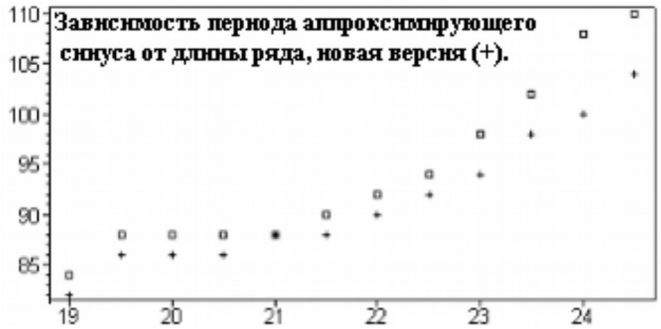
[1] *ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, ishib@izmiran.ru*
[2] *МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Понятие «цикл Гляйсберга» возникло из анализа небольшого объема данных ряда чисел Вольфа, которые характеризуются различной степенью достоверности и с ключевой ролью циклов 5÷7 минимума Дальтона (МД).

В тридцатых годах прошлого столетия при анализе первых 16 циклов Гляйсберг [1] отметил периодичность их максимумов в семь – восемь циклов, а позже дал уточненное значение периода -- около 80 лет. В работах, сделанных за последние 60 лет (разными авторами в ***разное время***), этот период оценивается в пределах 80 -- 110 лет. Ряд исследователей выделяют конкретное значение периода цикла Гляйсберга в 88 лет. Так как разные авторы анализировали ряд *WSN* различной длины, то в работе [2] исследовано влияние длины ряда на этот период и отмечено:

- *упорядоченный* рост периода от 82 до 110 лет (вертикальная ось в годах) при увеличении длины ряда от 18 до 24 циклов (ось OX в циклах – начало цикла и его максимум) **;**

– четко прослеживается локальное проявление 88-летней гармоники у старой версии ряда**.**



Неустойчивость (рост) оценки периода «вековой» гармоники связана с увеличением доли достоверных данных (циклов) в анализе, так как ряд *WSN* (≈ *Wrest* U *Wtool*) включает восстановленный ряд *Wrest* с 1749 по1849 г. и далее данные регулярных наблюдений — достоверный ряд *Wtool*. Объединение отрывочных данных с различными плотностью наблюдений, амплитудным разрешением и масштабированием нарушит согласованность временных фрагментов разного масштаба (например, структура циклов и их взаимосвязь), что проявилось при формировании ряда *Wrest*. Мы имеем не только несогласованность характеристик рядов *Wrest* и *Wtool*, но и противоречивость параметров самого ряда *Wrest* [3]. За асимптотику роста периода «вековой» гармоники, т. е. при нивелировании роли ряда *Wrest,* можно взять период аппроксимирующего синуса ряда *Wtool* равный 150 годам [4]. Тогда дальнейшая, с учетом этого, коррекция данных *Wrest* (длина ряда, площади циклов) отразится, с большой вероятностью, на минимуме Дальтона и может изменить понятие «цикл Гляйсберга». Разумно говорить не о «цикле Гляйсберга», завязанного на МД, а о длиннопериодной компоненте, соответствующей ряду Wtool и скорректированному ряду Wrest.

1. Gleissberg W. A long-periodic Fluctuation of the Sun-spot Numbers // Observatory. V. 62, 1939, 158 – 159.
2. Шибаев А.И. Зависимость периодов «вековой» гармоники от протяжённости исследуемых рядов для старой и новой версий ряда чисел Вольфа // Труды XV конференции молодых ученых — 2018. ИКИ РАН, Москва, 2018, 154 – 157.
3. Шибаев И.Г. Старая и новая версии ряда чисел Вольфа: согласованность характеристик восстановленной и инструментальной частей рядов // Труды Всеросс. ежегодной конференции по физике Солнца: Солнечная и солнечно-земная физика -- 2019, Пулково, Санкт –Петербург, 7 – 11 октября 2019 г., 463 – 466.
4. Ишков В.Н, Шибаев И.Г. Циклы солнечной активности: общие характеристики и современные границы прогнозирования // Известия РАН, серия физическая. Т. 70. № 10, 2006, 1439 – 1442.

SPATIAL AND TEMPORAL PROPERTIES OF THE SOLAR CYCLE FROM RATAN-600 MICROWAVE OBSERVATIONS

A. V. Shendrik, V. M. Bogod, K. M. Kuzanyan, T. I. Kal'tman, and E. A. Kurochkin

Special Astronomical Observatory of R.A.S., St Petersburg branch, Russian Academy of Sciences, Russia, ashend90@gmail.com
IZMIRAN, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, kuzanyan@izmiran.ru

The study involves the obtainment of regular tracers of the solar cycle in the radio range by activity manifestations in the chromosphere and corona. Our research method consists of the systematic processing of the RATAN-600 radio data at frequencies 3–18 GHz obtained during more than one cycle of solar activity and their comparison with other databases of time series characterizing the magnetic activity of the Sun at the photospheric level. In the first phase of this work, we identified an array of approximately 600 active regions that evenly covers all phases of solar cycle 24 in approximately 9 years, for which we reliably identified the local radio sources based on RATAN-600 data, as well as data from other databases, such as spacecraft of the Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration and the Solar Dynamics Observatory. The sample is statistically homogeneous and evenly distributed over solar latitudes in both hemispheres. The statistical relationships between the sunspot areas and the parameters of intensity and polarization of local radio sources are obtained. It is shown how the spectral flux density of local radio sources in the chromosphere and corona at different frequencies increases with the increase in the sunspot area (and, consequently, the magnetic flux). The estimates of exponents of this dependence are obtained [1].

1. A.V. Shendrik, V.M. Bogod, K.M. Kuzanyan, T.I. Kaltman, and E.A. Kurochkin "Spatial and Temporal Properties of the Solar Cycle from RATAN-600 Microwave Observations"// Geomagnetism and Aeronomy V. 60 N 8 P. 999–1006. 2020.

НОВЫЙ СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА С ИХ ВРЕМЕННЫМИ ПРОИЗВОДНЫМИ

Яковлева С.В., Старченко С.В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Калужское шоссе 4, Троицк, Москва, 108840
E-mail: svyakov@izmiran.ru

Предлагается оригинальное для физики Солнца статистическое исследование чисел Вольфа W и их временных производных W´ посредством модификации “Stem and Leaf Plot” методик, которые часто используются для анализа экспериментальных данных в различных областях знаний. Аргументируется высокая детальность и полезность таких процедур при интерпретации «статистически необычных» массивов данных. Необычно для W большое отклонение от нормального распределения, когда наиболее вероятные значения около 15-ти, а среднеквадратичное, медианное и среднее: 100, 65.3 и 78.5. Иначе от нормального распределения отклоняются W´, которые наиболее вероятны вблизи минимумов активности при W´ около -5/год, а медианное и среднее: -4.95 (из-за более длительной фазы падения активности) и 0.00 (из-за преобладающей цикличности). При этом среднеквадратичное W´=37.2, что обусловлено «тяжелыми хвостами» с максимальным W´=147, а вблизи максимумов активности W´ «размазан» от 2 до 108/год. Соответствующие МГД динамо оценки выдают генерирующую конвективную скорость порядка нескольких м/сек и глобальный альфа эффект порядка десятых долей м/сек.

ДИАГНОСТИКА ЛЕНГМЮРОВСКИХ ВОЛН В СОЛНЕЧНОЙ ПЛАЗМЕ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОВ ПОПЕРЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ПЛАЗМЕ НА ДВОЙНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТОТЕ

Кудрявцев И.В.[1], Кальтман Т.И.[2]

[1]ФТИ им . А.Ф. Иоффе, г. Санкт Санкт-Петербург, Россия, Igor.Koudriavtsev@mail.ioffe.ru
[2] Санкт-Петербургский филиал САО РАН, г. Санкт Санкт-Петербург, Россия

Радиоизлучение солнечной плазмы является одним из основных источников информации о физических процессах, происходящих на Солнце. Это излучение может иметь как тепловую природу (см., например [1, 2]), так и нетепловую, в том числе генерироваться гиросинхротронным и тормозным механизмами при распространении быстрых электронов в магнитоактивой плазме [3-6] или генерироваться плазменной турбулентностью [7-9]. В последнем случае генерация поперечных электромагнитных волн на электронной плазменной частоте ω_{pe} может происходить при рассеянии ленгмюровских волн на электронах и ионах плазмы [7]. Кроме этого, в плазме возможно излучение на частотах около $2\omega_{pe}$, которое образуется при слиянии двух ленгмюровских волн [7,8]. При этом, ленгмюровская турбулентность может генерироваться, например, потоками быстрых электронов, ускоряемыми во время солнечных вспышек. Таким образом, регистрация радиоизлучения от активных образований на солнце позволяет диагностировать как саму солнечную плазму, так и определять характеристики высокоэнергетичных электронов.

С целью диагностики параметров ленгмюровсих волн (угловое распределение и спектр) в докладе рассматриваются спектральные особенности электромагнитных волн, генерируемых в плазме при попарном слиянии ленгмюровских волн, и особенности направленности их излучения для различных типов спектров и угловых распределений плазменных волн.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-29-21016.

1. Железняков В.В. Излучение в астрофизической плазме. М, «Янус-К», 1997. 528с
2. Bogod V.M., Kal'tman T.I., Peterova N.G., Yasnov L.V.// Cosmic Research. 2017. V. 55 N 1. P. 1-11.
3. Nakariakov V.M., Anfinogentov S., Storozhenko A.A., Kurochkin E.A., Bogod V.M., Sharykin I.N., Kaltman T.I.// The Astrophysical Journal. 2018. V. 859. N 2. article id. 154, 8, 2018
4. Fleishman Gregory D., Loukitcheva Maria A., Kopnina Varvara Yu., Nita Gelu M., Gary Dale E.// Astrophys. J. 2018. V. 867. I. 1. article id. 81, 11pp, 2018
5. Gary D.E., Bastian T.S., Chen B., Fleishman G.D., Glesener L.// Science with a Next Generation Very Large Array, ASP Conference Series, Vol. 517. ASP Monograph 7. Edited by Eric Murphy. p.99
6. Gary Dale E., Chen Bin, Dennis Brian R., Fleishman Gregory D., Hurford Gordon J., Krucker Säm, McTiernan James M., Nita Gelu M., Shih Albert Y., White Stephen M. and Yu Sijie// Astrophys. J. 2018. V. 863. Issue 1. article id. 83, 9 pp
7. В.Н. Цытович, Теория турбулентной плазмы. М, Атомиздат 1971.424 с.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВИСТЛЕРОВ НА СПЕКТР МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛИ

Мельников В.Ф. [1], **Филатов Л.В.** [2]

[1] *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург,* v.melnikov@gaoran.ru
[2] *Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород*

Исследования циклотронной неустойчивости вистлеров в радиационных поясах Земли выявило три режима питч-угловой диффузии энергичных электронов на турбулентности вистлеров [1-3]: слабую ($\tau > \sigma l/v$), умеренную ($l/v < \tau < \sigma l/v$) и сильную ($\tau < l/v$), где τ – характерное время, за которое питч-угол электрона изменяется на угол $\pi/2$, σ – пробочное отношение магнитной ловушки, l – её полудлина. Решение стационарной задачи (с независящей от времени мощностью источника частиц) показало, что разным режимам соответствуют разные наборы параметров захваченных в ловушке и высыпающихся из неё частиц. Это относится к концентрации, времени жизни, энергетическому и питч-угловому распределениям частиц. Переход от режима слабой к режимам умеренной и сильной диффузии зависит от мощности стационарного источника частиц.

В работе [4] решена нестационарная задача, в которой учитывается, что нетепловые электроны импульсно, но в течение конечного времени, инжектируются в неоднородную по магнитному полю и плотности плазмы вспышечную петлю. В настоящем докладе показано, что при заданном временном профиле мощности инжекции нетепловых электронов все три режима турбулентной диффузии (слабой, умеренной и сильной) могут реализоваться одновременно. При этом каждому из режимов соответствует свой энергетический диапазон в спектре электронов. Установлено, что обратное воздействие сформировавшегося спектра турбулентности вистлеров значительно изменяет характеристики пространственного, временного, питч-углового и энергетического распределений электронов. В частности, энергетический спектр электронов на интервале 30 кэВ – 10 МэВ может испытывать переходы от более пологого к более крутому и опять к более пологому. Как следствие, это приводит к изломам частотного спектра гиросинхротронного излучения, что важно учитывать при радиодиагностике параметров вспышечной петли.

Работа выполнена в рамках Государственного задания №0041-2019-0019, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-52-26006.

1. Kennel C.F., Petschek H.E. J.Geophys, 1966, V.71, №1, P.1-28.
2. Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфеновские мазеры, ИПФАН, 1986, -190с.
3. Bespalov P.A., Zaitsev V.V., Stepanov A.V. ApJ, 1991, V.374, P.369-373.
4. Filatov L.V., Melnikov V.F. Ge&Ae, 2020, V.60, P.1137

СТРАТИФИКАЦИЯ АТМОСФЕРЫ И ПОТОК АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАБЛЮДЕНИЙ ДОПЛЕРОВСКИХ СКОРОСТЕЙ

Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г.

КрАО РАН, пгт. Научный, yur_crao@mail.ru

В настоящее время имеется большое количество данных, свидетельствующих о существенном вкладе альфвеновских волн в нагрев хромосферы, переходной области и короны Солнца [1,2]. Между тем при оценке потока волновой энергии по наблюдаемым амплитудам доплеровских скоростей δV обычно не принимается во внимание стратификация атмосферы. В частности, усредненная по времени плотность потока энергии альфвеновских волн F находится с помощью хорошо известного соотношения [3,4], полученного для однородной среды: $F = (\varrho\delta V^2/2)Va$, где ϱ – плотность плазмы, Va – альфвеновская скорость, что представляется слишком грубым приближением к реальности.

В настоящей работе рассматривается распространение альфвеновских волн с учетом стратификации изотермической атмосферы. Показано, что если в нижней атмосфере (фотосфера/хромосфера) Солнца период волн $T >> 4\pi H/Va$ = 25-300 с, где H – характерная шкала высот, то часто используемая формула для оценки потока, приведенная выше, может приводить к заниженным в несколько раз значениям F. Это объясняется ангармоническим по пространству характером распространения волн в стратифицированной среде. Сделан вывод о необходимости учета стратификации атмосферы при оценки потока альфвеновских мод F по наблюдениям доплеровских скоростей δV, в первую очередь, в хромосфере Солнца, где максимальная скорость Va может достигать сотен километров в секунду.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и гранта РФФИ (№ 20-52-26006).

1. Mathioudakis M., Jess D.B.,·Erdélyi R. // Space Sci. Rev. 2013. V.**175**. P.1.
2. Van Doorsselaere, T., Srivastava, A.K., Antolin P. et al. // Space Sci. Rev. 2020. V.**216**. Id.140.
3. Jess, D.B., Mathioudakis, M., Erdélyi, R., et al. // Science. 2009. V.**323**. P.1582.
4. Grant S.D.T., Jess D.B., Zaqarashvili T.V. // Nature Phys. 2018. V.**14**. P.480.

ПРЕДВСПЫШЕЧНАЯ ДИНАМИКА КОРОНАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ NOAA 12673

Шаин А.В., Мельников В.Ф.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, alexandershain.5@gmail.com

Основным предметом исследования является динамика пространственной структуры магнитного поля и электрических токов в активных предвспышечных областях. Распределение магнитного поля в короне восстанавливалось в нелинейном бессиловом приближении с помощью метода [1] по данным инструмента SDO/HMI. Особое внимание уделено активной области NOAA12673, известной благодаря происшедшими в ней мощным вспышкам 4-7 сентября 2017 года. Знание эволюции 3D-структуры магнитного поля позволило рассчитать 3D-распределения электрических токов и их пространственную динамику. Проанализировано поведение силовых линий поля и токов, соответствующих ярчайшим петлям в ультрафиолетовом излучении по данным инструмента SDO/AIA. Проведён визуальный поиск пространственных и временных особенностей восстановленного магнитного поля и электрических токов, которые могли послужить триггерами вспышек. Для совместного анализа использовались данные о динамике распределения яркости микроволнового излучения, зарегистрированного Радиогелиографом Нобеяма.

1. Rudenko, G.V., Myshyakov, I.I. // Solar Phys. 2009. **257**, 287.

MODULATIONAL INSTABILITY OF FAST SAUSAGE MODE AS ONE OF THE POSSIBLE MECHANISMS FOR QUASIPERIODIC PULSATIONS DURING THE SOLAR FLARES

Naga Varun Y

SAO RAS, Nizhny Arkhyz, Russia, naga.varuny@gmail.com

Quasiperiodic pulsations (QPPs) are regularly observed during solar flares all across the electromagnetic spectrum from the vicinities of the flare. The fact that they occur during the solar flare can help us to understand and diagnose the flaring process. Over a period of time many mechanisms for the emergence of QPPs were proposed and they can be broadly classified into two categories namely load/unload mechanisms and magnetohydrodynamic (MHD) mechanisms [1]. Within the category of MHD mechanisms a part of the observed QPPS can be explained or modelled using the nonlinear fast sausage mode of the coronal loops. As the fast sausage modes are highly dispersive in the long wavelength domain, the nonlinearity can be studied in an envelope approximation for moderate amplitudes with the help of the so-called nonlinear Schrödinger equation (NSE). Such a NSE with cubic nonlinearity was earlier derived by [2] and is given by the following expression:

$$i\left(\frac{\partial\Psi}{\partial t}+V_g\frac{\partial\Psi}{\partial z}\right)+\alpha\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}+\sigma\Psi|\Psi|^2=0$$

Here Ψ – the complex sausage radial velocity, α,σ – nonlinear parameters and V_g is the group velocity of the quasi-monochromatic fast sausage wave. One of the interesting solutions to such a NSE is given by the frequency renormalized plane wave (FRPW) solution, which has the form: $\psi(z,t)=Ae^{\pm iA\sqrt{\frac{\sigma}{\alpha}}(z-V_g t)}$, where A is the amplitude of the fast nonlinear sausage mode. Such a solution represents a globally coherent sausage mode, where the entire cylinder radially expands with the velocity amplitude A. Although FRPW is an exact solution for the NSE equation, it is instable to perturbations. This instability is called the Benjamin-Feir instability or modulational instability [3] because the perturbations are modulated due to nonlinearity and the instability exponentially increases breaking the coherent state into small pulses and the necessary condition for such an instability is given by $\alpha\sigma>0$, which is called as the Lighthill criterion.

We have numerically solved the NSE of fast sausage mode and found quasiperiodic oscillations for every pair of nonlinear parameters (α,σ) satisfying the Lighthill criterion. Although the FRPW is interesting, it should be rare to find such a coherent state in coronal loops of the quite region. However, one can imagine the formation of a global coherent mode in active regions as follows: Active regions are essentially nonpotential and there is current flowing through the coronal loops, which gives rise to a compressional magnetic field. If the current is too large, we observe the so-called pinch effect. Now if for some reason the current is cut off then the over pressure caused due to the magnetic field pushes the walls of the loop outwards. This state can indeed be described by the globally coherent FRPW, which is modulationally instable.

Our analysis shows that we observe quasiperiodic oscillations in the radial velocity at various sites of the coronal loop. As velocity and displacement act in the same direction, the loop's radius fluctuates with the radial velocity thereby inducing corresponding density perturbations along the loop. This suggests a mechanism for the formation of QPPs.

The work was accomplished due to the government contract of the SAO RAS approved by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

1. Nakariakov V. M., Melnikov V.F. // DOI 10.1007/s11214-009-9536-3
2. Mikhalyaev B.B., Ruderman M. S. et al // DOI: 10.1134/S0016793216080168
3. Zakharov V.E., Ostrovsky L.A. // Physica D 238 (2009) 540–548

О ПРИРОДЕ КПП В СЛАБОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ ПО ДАННЫМ РАДИОГЕЛИОГРАФОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Куприянова Е.Г.[1], Колотков Д.Ю.[2,3], Кашапова Л.К.[2], Кудрявцева А.В.[2], Тан Ч.-М.[4], Рид Х.А.С.[5]

[1] *ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru*
[2] *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*
[3] *Уорикский Университет, г. Ковентри, Великобритания*
[4] *НАО КАН, г. Пекин, Китай*
[5] *Отдел физики космоса и климата, Университетский колледж Лондона, Великобритания*

Квазипериодические пульсации (КПП) являются часто наблюдаемым и имеющим различную природу явлением в излучении солнечных вспышек различной мощности в разных спектральных диапазонах. Анализ этих явлений позволяет глубже понять природу процессов переноса энергии в солнечной плазме, а также улучшить наше понимание механизмов солнечной вспышки. Мы представляем результаты исследований события, произошедшего на фазе спада солнечной вспышки рентгеновского класса мощности M4. Наблюдения этого события одновременно двумя инструментами нового поколения — Сибирским радиогелиографом (4–8 ГГц, Россия) и радиогелиографом MUSER (0.4–2 ГГц, Китай) — выявили присутствие КПП одновременно в микроволновом и метровом диапазонах. Когерентное излучение показывает квазипериодические узкополосные всплески в диапазоне 0.4–0.8 ГГц с характерным временным масштабом порядка 5 с и тонкой структурой внутри каждого всплеска. В диапазоне 4–8 ГГц найдены более долгопериодические КПП, демонстрирующие небольшое уменьшение периода со временем от 35 с до 25 с. Целью работы является выявление наличия или отсутствия связи между двумя видами КПП с помощью анализа их особенностей в двух видах излучения, а также спектральной и пространственной информации. На основании проведенного исследования предложены и обсуждаются наиболее вероятные сценарии развития события.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ и Лондонского Королевского Общества № 21-52-10012.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В ТРЕХЛЕНТОЧНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ

Зимовец И.В., Шарыкин И.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivanzim@iki.rssi.ru

Представлены результаты анализа наблюдений квазипериодических пульсаций (КПП) с периодом P=54±13 с, обнаруженных по данным RHESSI во время трехленточной солнечной вспышки M1.1 06:49 UT 5 июля 2012 г. КПП проявляются во временных профилях температуры (T) и меры эмиссии (EM) сверхгорячей плазмы (T~30-50 МК), но не видны в профилях параметров горячей плазмы (T~15-20 МК) при аппроксимации спектра рентгеновского излучения вспышки спектром тормозного излучения двухтемпературной плазмы (однотемпературное приближение дает плохую аппроксимацию с более высокой невязкой). Временные профили T и EM сверхгорячей плазмы находятся в противофазе. Кроме того, КПП с аналогичным периодом обнаруживаются во временном профиле спектрального индекса нетепловых электронов, если наблюдаемый рентгеновский спектр аппроксимировать комбинацией спектров тормозного излучения однотемпературной максвелловской плазмы и нетепловых электронов. При этом степенной спектр нетепловых электронов очень мягкий с показателем от -7 до -9. КПП не заметны в рентгеновском потоке по данным RHESSI и GOES, а также в радиоданных. КПП сопровождаются перемещением “одиночного” рентгеновского источника со скоростью не выше 150 км/с (средняя скорость около ~20 км/с) вдоль центральной вспышечной ленты над узким (<5 Мм) “языком” отрицательной магнитной полярности, вытянутым (~20 Мм) между двумя областями положительной полярности. Мы интерпретируем наблюдаемые КПП как результат последовательных эпизодов энерговыделения в разных магнитных трубках (петлях) вспышечной области. Обсуждаются возможные триггеры “распространяющегося” фронта энерговыделения (магнитозвуковые волны, “хлопающие” осцилляции токового слоя, тепловая неустойчивость токового слоя, асимметричная эрупция магнитного жгута и др.), а также возможность инструментального происхождения КПП.

ЖЕСТКОЕ РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ И СТАДИИ ПРЕДВЕСТНИКА

Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е.

ФТИ имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, Shabalin.FTI@yandex.ru

В солнечных вспышках на ранней стадии, в первые секунды, часто наблюдается корональный источник в жестком рентгеновском (ЖР) излучении наравне с излучением из хромосферы. В данной работе были проанализированы возможные механизмы, которые могли бы обусловить появление ЖР источника в вершине в первые секунды развития вспышки. Поток тормозного ЖР излучения пропорционален концентрации плазмы и ускоренных электронов. Следовательно, в основе причин появления такого источника должны лежать механизмы, вызывающие захват и удержание ускоренных электронов в вершине и/или вызывающие достаточно быстрое увеличение концентрации плазмы. Среди рассмотренных механизмов - модель коллапсирующей ловушки, в которой в результате сжатия магнитной трубки в корональной части существенно увеличивается концентрация плазмы. “Коллапс” вызван изменением индукции магнитного поля в корональной части петли при её релаксации. Рассмотрена модель, в которой в магнитной петле присутствуют ионно-звуковые фронты, возникающие при генерации ионно-звуковой турбулентности с уровнем $W^s/n_kB T_e=10^{-4}$ на обратном токе в области сильного индукционного электрического поля. Также рассмотрена модель, в которой происходит увеличение концентрации плазмы в вершине петли за счет эффекта “испарения” хромосферной плазмы при ее нагреве пучками ускоренных электронов. Из анализа моделей можно заключить, что яркую вершину в ЖР диапазоне на начальной стадии вспышки, может обеспечить либо резкое увеличение концентрации плазмы в процессе релаксации магнитных полей (модель коллапсирующей ловушки), либо механизм предварительного нагрева петель, который сопровождается ростом концентрации плазмы без ускорения электронов до энергий выше 20-30 кэВ.

Работа поддержана Грантом РНФ № 20-72-10158

ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ БЕЗ «ЭФФЕКТИВНОГО» УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ

Шарыкин И.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivan.sharykin@phystech.edu

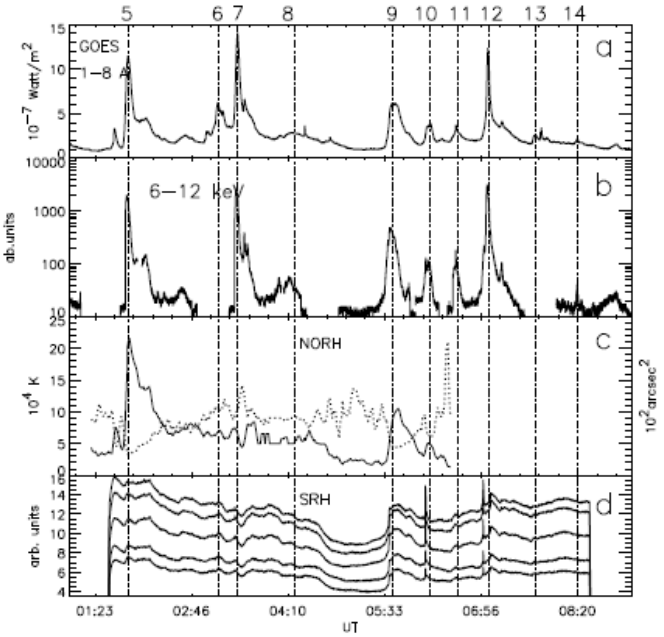
В работе рассматривается солнечная вспышка класса M1.2, произошедшая 5 июля 2012 г. 06:49 UT в активной области NOAA 11515. Событие примечательно тем, что в нем было обнаружено гелиосейсмическое возмущение, несмотря на малый поток жесткого рентгеновского излучения в диапазоне 25-50 кэВ и очень мягкий спектр по данным RHESSI. Данный факт интересен тем, что ускоренные электроны обычно рассматриваются главной причиной генерации гелиосейсмических возмущений на уровне фотосферы. При этом потоки жесткого рентгеновского излучения являются основным проявлением нетепловых электронов. Большинство известных солнцетрясений детектировалось в солнечных вспышках с большими потоками жесткого рентгеновского излучения на высоких энергиях (как минимум до 100-300 кэВ). Данный факт указывает на явную связь между ускоренными частицами и мощным энереговыделением в фотосфере. Рассматриваемое событие противоречит стандартной картине. Анализ доступных рентгеновских спектров по данным RHESSI показывает, что их можно объяснить двумя способами. Рентгеновский спектр в диапазоне 25-50 кэВ объясняется степенным законом с индексом около 7-10, либо наличием сверхгорячей плазмы ~30-50 МК. В том и другом случае не понятно, каким образом можно возбудить достаточно сильное гелиосейсмичсекое возмущение в глубоких слоях солнечной атмосферы. Из результатов анализа рентгеновских спектров получены некоторые физические оценки параметров тепловой плазмы, ускоренных электронов, потоков энергий различных видов. Обсуждаются механизмы генерации гелиосейсмичсекого возмущения во время данной солнечной вспышки.

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЙ НАГРЕВ И МИКРОВСПЫШКИ В РАЗВИВАЮЩЕЙСЯ ИЗОЛИРОВАННОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

Алтынцев А.Т., Мышьяков И.И., Мешалкина Н.С., Федотова А.Ю.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru

Обсуждаются свойства и причины повышения в течение 14 часов микроволнового и мягкого рентгеновского излучения АО 12635, сопровождаемого последовательностью микровспышек рентгеновского класса B и C. Микроволны наблюдались на Сибирском Радио Гелиографе в диапазоне частот 4.5 – 7.5 ГГц в изолированной активной области 8-9 февраля 2017 г. В этот период наблюдалось упрощение магнитной структуры и усиление вертикальных токов, распределенных по западной части активной области. Долгосрочное увеличение яркости происходило, когда вертикальный ток превышал значение $6x10^{12}$А. В это время мера эмиссии, рассчитанная по рентгеновским данным GOES, повышена и обеспечивает наблюдаемый прирост теплового тормозного излучения в микроволнах. На этом квази-постоянном фоне наблюдалось около двух десятков микровспышек мягкого рентгеновского излучения с длительностью 6-10 минут. В жестком рентгеновском диапазоне всплески регистрируются в каналах RHESSI до 25 кэВ. В соответствующих микроволновых всплесках обнаружены импульсная и гладкая составляющие. Импульсное излучение регистрируется в начале всплеска в диапазоне частот 4.5–7.5 ГГц, и его спектр указывает на гиросинхротронный механизм генерации. Моделирование спектра показывает, что нетепловых электронов мало, но их энергия достигает нескольких сотен кэВ. Гладкая компонента всплеска преобладала в излучении на 17 ГГц и генерировались тормозным механизмом. Положения источников всплесков и долговременного излучения совпадали друг с другом на частоте 17 ГГц и близки к положениям модельных источников, рассчитанных по EUV-излучению. Расчеты магнитного поля показали, что положение области выделения энергии соответствует стабильно существующему пучку магнитных нитей с током, и энергичные частицы релаксируют над магнитным островом, расположенным между головной и хвостовой частями активной области.



Изменения параметров излучения активной области во времени 9 февраля 2017 г.

a)Световые кривая GOES; b) HXR излучение; c) 17 GHz профили с 3 мин сглаживанием: максимум яркостной температуры (сплошная) и площадь источника (пунктир); d) Превышение уровня излучения 9 февраля над излучением 8 февраля. Частоты в диапазоне от 4.5 ГГц (верхняя кривая) до 7.5 ГГц (нижняя)

.

Altyntsev A.T., Meshalkina N.S, Fedotova A.Yu., Myshyakov I.I., 2020, *ApJ*, **905,** 149

ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ ОХЛАЖДЕНИЯ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ ФАЗЫ СПАДА СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НИЖНИХ СЛОЕВ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ

Кашапова Л.К.[1], **Брумол А.-М.**[2], **Ларионова А.И.**[3], **Куприянова Е.Г.**[3], **Мотык И.Д.**[4]

1 Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, lkk@iszf.irk.ru

2 Университет г. Варвик, Ковентри, Великобритания

3 Главная (Пулковская) Астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия

4 Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

Фаза спада солнечной вспышки обычно привлекает меньше внимания, чем импульсная фаза, во время которой происходит наиболее энергетически мощные процессы. Тем не менее, именно эта фаза вспышки представляет собой взаимодействие процессов охлаждения, определяемых потерями за счет излучения и теплопроводности, и процессов энерговыделения различной природы. Одной из проблем при исследовании фазы спада является выделение той части временного профиля вспышки, которая определяется процессами, связанными с потерей энергии. В настоящее время разработан аналитический шаблон, описывающий процессы охлаждения только корональной плазмы, излучающей в рентгеновском диапазоне [1]. Целью данной работы было получить усредненный временной профиль фазы спада солнечной вспышки для более глубоких и холодных слоев солнечной атмосферы и подобрать аналитические шаблоны, наилучшим образом описывающие эволюцию интенсивности излучения.

Мы представляем результаты исследования фазы спада солнечных вспышек в спектральных полосах SDO/AIA 1600 A, 1700 A и 304 A, которые традиционно связывают с излучением хромосферы и области температурного минимума. Нами были воссозданы временные профили солнечных вспышек Солнца-как-звезды, полученные с помощью изображений SDO/AIA, за 2011-2014 гг. На основании этих временных профилей были реконструированы медианные временные профили для каждой из спектральных полос. Мы использовали временные профили только тех событий, где затухание интенсивности происходило медленно и непрерывно без присутствия значительных новых всплесков. Для реконструкции аналитического шаблона был использован подход, основаный на методе, успешно примененном к вспышкам в белом свете, наблюдавшихся на карлике M4 [2]. Обсуждаются возможности использовать полученные аналитические шаблоны для описания процессов на фазе спада, а также результаты, полученные при сравнении медианных временных профилей как между собой, так и с результатами моделирования, а также с результатами наблюдений звездных вспышек.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 17-52-10001 и the Royal Society International Exchanges, проект IEC/R2/170056.

1. Gryciuk M. et al. // Solar Phys. 2017, V. **292**, P. 77.
2. Davenport J. A.- R. et al. // Astrophys. J. 2014, V. **797**, P. 122.

Пространственное и временное распределение энергии в солнечной вспышке 16 февраля 2014 года

Г.Г. Моторина, Г.Д. Флейшман, L. Kleint, G.M. Nita, E.P. Kontar

Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН, Санкт-Петербург, Россия, motorinagalina@gmail.com

Энергия магнитного поля, выделяющаяся во время солнечных вспышек, преобразуется в другие типы энергии, которые могут включать нетепловую энергию ускоренных частиц, тепловую энергию нагретой вспышечной плазмы, кинетическую энергию корональных выбросов массы, джетов, турбулентной плазмы. Процессы и параметры, управляющие разпределением высвобождаемой энергии между этими компонентами, до сих пор остаются открытым вопросом.

В настоящей работе представлен анализ энергетического баланса между тепловой, нетепловой и кинетической компонентами во время солнечной вспышки SOL2014-02-16T064620 (C1.5), имеющей один короткий нетепловой всплекс во время импульсной фазы. На основе данных SDO/AIA и RHESSI была проведена оценка вспышечной плазмы. Для оценки кинетической энергии проведен анализ ультрафиолетовых данных со спутника IRIS. Для оценки нетепловой энергии были использованы микроволновые (NoRP) и рентгеновские (Konus-Wind) данные совместно с 3D моделированием. Полученные результаты показывают, что геометрия вспышки согласуется с морфологией трех петель; нетепловые электроны находятся только в одной петле, остальные две петли являются тепловыми; вклад нетепловой энергии согласуется с тепловой энергией, распределенной по петлям; вклад кинетической энергии в общую энергетику вспышки пренебрежимо мал. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 20-72-10158 (Моторина Г.Г.).

ЭРУПТИВНЫЕ СОБЫТИЯ 21.06. 2015 Г. ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АО NOAA12371

Курочкин Е.А.[1], Петерова Н.Г.[1], Топчило Н.А.[2]

1 СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия
2 СПб ГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Продолжена разработка методов прогнозирования солнечных вспышек с использованием наблюдений в микроволновом диапазоне волн [1]. Приведены результаты анализа наблюдений активной области (АО) NOAA 12371, в квазиспокойном состоянии отличавшейся повышенной яркостью излучения на микроволнах и породившей множественные эруптивные события. По наблюдениям на РАТАН-600 в период события 21.06.2015 г. зафиксировано резкое кратковременное изменение структуры изображения источника микроволнового излучения над АО NOAA 12371, предположительно интерпретированное кратковременным нагревом плазмы над областью дельта-конфигурации магнитного поля в хвостовой части АО. В этот момент отмечается развитие сильно вытянутой УФ-петли над разнополярными пятнами и образование между ними уярчения. Благодаря высокой чувствительности РАТАН-600 при поляризационных измерениях удается в рамках некой модели МП локализовать положение облака, в котором происходит высвечивание или ускорение быстрых частиц.

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации.

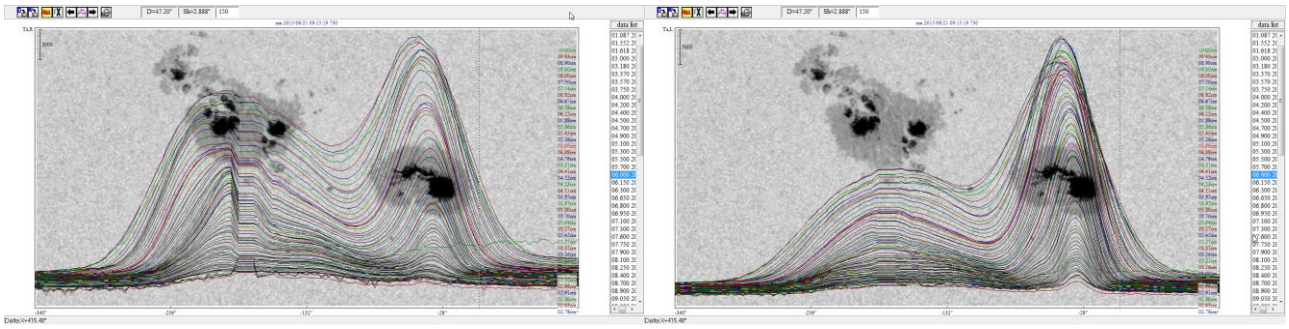


Рис.1. АО NOAA12371 на многоволновых (3-18 ГГц) сканах РАТАН-600 в параметрах Стокса R (слева) и L (справа) 21 июня 2015 г. в момент прохождения центрального меридиана, наложенных на фотогелиограмму.

1. Курочкин Е.А., Петерова Н.Г., Топчило Н.А., Шендрик А.В. О физическом смысле критерия Танака-Еноме, Тезисы Пятнадцатой ежегодной конференции "Физика плазмы в солнечной системе" 10-14 февраля 2020, ИКИ РАН https://plasma2020.cosmos.ru/

ВРЕМЕННЫЕ ЗАДЕРЖКИ МЕЖДУ СУБ-ТЕРАГЕРЦОВЫМ И МЯГКИМ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК: НАБЛЮДЕНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

Смирнова В.В.[1], Цап Ю.Т.[1], Моргачев А.С.[2], Моторина Г.Г.[3,4], Барта М.[4]

[1]*КрАО РАН, пгт. Научный, Республика Крым, Россия, vvsvid.smirnova@yandex.ru*

[2]*ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия*

[3]*ГАО РАН, Санкт-Петербург, Россия*

[4]*Astronomical Institute ASCR, 251 65 Ondrejov, Czech Republic*

Вопрос о природе растущего с частотой (положительного) спектра суб-терагерцового (суб-ТГц) излучения солнечных вспышек до сих пор остается предметом дискуссий. К настоящему времени предложено около десятка различных механизмов суб-терагерцового излучения. Между тем, детальный сравнительный анализ временных профилей излучения в различных диапазонах до сих пор не проводился. Ранее для 15 вспышек с положительным наклоном спектра в суб-ТГц диапазоне было показано, что наблюдаемый наклон можно объяснить действием теплового тормозного механизма, связанного с нагревом хромосферной плазмы ускоренными в короне электронами [1]. В частности, согласно работе [1] должен наблюдаться эффект Нойперта, т.е. максимум суб-ТГц излучения должен наступить на несколько минут раньше максимума мягкого рентгеновского излучения. Однако временные задержки между профилями излучения в различных диапазонах не исследовались, что могло значительно повлиять на сделанные выводы.

В представленной работе, исходя из событий, рассмотренных в работе [1] и других результатов наблюдений, мы выбрали 11 вспышек с положительным наклоном суб-ТГц спектра и сравнили временные профили суб-ТГц и мягкого рентгеновского излучения на предмет наличия временных задержек между максимумами с точностью до 30 с.. Наблюдения мягкого рентгеновского излучения вспышек в каналах 1-8, 0.5-4 Å были получены по данным КА GOES. Временные профили суб-ТГц излучения вспышек на частотах 93, 140, 210, 230, 345, 405 ГГц включали наблюдательные данные, полученные на радиотелескопах РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана, SST, KOSMA, BEMRAK.

В результате кросс-корреляционного анализа, суб-ТГц события были разделены на два типа: I. поток суб-ТГц излучения опережает по времени поток мягкого рентгеновского излучения на 2-9 минут; II. характер поведения соответствующих потоков в среднем совпадает. При этом 5 событий рентгеновского класса X относились к I типу, тогда как 5 вспышек класса M - к типу II.

Сделан вывод о том, что предположение о доминирующем вкладе теплового механизма излучения в положительный спектр суб-ТГц излучения вспышек довольно часто не согласуется с предсказаниями теории, развитой в работе [1]. Предполагается, что положительный наклон суб-ТГц спектра событий типа II может определяться механизмами излучения не только тепловой, но и нетепловой природы, которые реализуются в различных слоях солнечной атмосферы.

Работа выполнена при частичной поддержке Минобрнауки НИР № 0831-2019-0006 (Цап Ю.Т.), грантов РФФИ № 20-52-26006 (Смирнова В.В., Моргачев А.С.) и РНФ 20-72-10158 (Моторина Г.Г.).

1. Kontar E.P., Motorina G.G., and Jeffrey N.L.S., et al. // A&A 2018. V. 620. ID. A. 95.

О ПРОИСХОЖДЕНИИ РАДИОВСПЛЕСКОВ II ТИПА

Чернов Г.П., Фомичев В.В.

*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия * e-mail: gchernov@izmiran.ru*

Солнечные радиовсплески II типа являются одними из наиболее мощных событий в радиоизлучении Солнца в метровом диапазоне длин волн. Общепринято, что агентом, возбуждающим всплески II типа, являются бесстолкновительные ударные волны. В их исследованиях сейчас сложилась сложная ситуация, когда уже вышли десятки работ с подробным изложением связи ударных волн (источников всплесков II типа) и корональных выбросов массы (КВМ), но без анализа механизмов радиоизлучения, без чего невозможно понять как начало излучения, так и связь всплесков II типа в метровом диапазоне с межпланетными всплесками II типа. Краткий обзор последних работ показывает разнообразный подход как к теоретическим моделям, так и к анализу наблюдений, порой не очень стыкующихся между собой. Причем это связано не только с использованием различных моделей электронной плотности, но прежде всего с различным представлением о типе ударной волны.

Проведенные здесь оценки показали, что при этом значения числа Маха превышали критические значения в рамках бунемановской неустойчивости. В рамках других моделей нет строгих ограничений на перпендикулярность фронта и остаются неясными причины как начала, так и конца излучения II типа. Клочковатая структура излучения вполне понятна в рамках бунемановской неустойчивости со строгой перпендикулярностью фронта, когда перпендикулярность ($\pm 2^{o}$) может многократно нарушаться, особенно на флангах ударного фронта. Отсутствие всплеска II типа еще не означает отсутствие ударной волны.

Статья направлена в печать в Astrophys. J.

"НЕУДАВШИЕСЯ" ЭРУПЦИИ СОЛНЕЧНЫХ ВОЛОКОН

Филиппов Б.П.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия, bfilip@izmiran.ru

Солнечные волокна (протуберанцы), которые внезапно начинают быстро подниматься вверх, т.е. становятся эруптивными, иногда замедляются и останавливаются на относительно небольшой высоте. Причины, по которым эрупции оказываются "несостоявшимися", во многом не ясны. Мы проанализировали около полутора десятков неудавшихся эрупций волокон, наблюдавшихся в эпоху максимума 24-го солнечного цикла. Отсутствие заметного извивания продольной оси волокон при эрупции не дает оснований предполагать винтовую неустойчивость в качестве триггера эрупций. Расчеты потенциального магнитного поля над исходным положением волокон показывают как монотонную, так и седлообразную зависимость индекса убывания поля от высоты. В последнем случае поворот горизонтальной составляющей поля выше седловины составляет более 100° относительно исходного направления. Внешнее поле выше этой области превращается из удерживающего магнитный жгут в выталкивающее его наверх. Быстрое движение волокон начинается с высоты, на которой значение индекса убывания около единицы, или несколько меньше. Наиболее вероятной силой, способной остановить подъем волокна, является гравитация.

СВЯЗЬ МЕЖДУ ДЛИТЕЛЬНОСТЬЮ И ВЕЛИЧИНОЙ УСКОРЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ В ИМПУЛЬСНЫХ ВСПЫШКАХ

Струмиский А.Б.[1], Григорьева И.Ю.[2], Логачев Ю.И.[3], Садовский А.М.[1]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, astrum@iki.rssi.ru,*

[2]*ГАОРАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

[3] *НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия*

Какая последовательность процессов на Солнце приводит к положительной обратной связи между движением и нагревом плазмы, ускорением электронов, а в итоге, к формированию корональных выбросов массы (КВМ), ударных волн и ускорению протонов? Возможный ответ на этот вопрос дает сравнение трех импульсных вспышек (SOL2012-07-06T01:37 M2.9, SOL2017-09-06T08:57 X2.2 и SOL2017-09-06T11:53 X9.3), в которых электроны ускорялись до релятивистских энергий, но только вспышка SOL2017-09-06T11:53 X9.3 сопровождалась КВМ и ускорением протонов. Видно два различия импульсных вспышек без КВМ: 1) они были ограничены высотой, которая характерна для радиоизлучения 1415 МГц (верхняя хромосфера); 2) в них максимум меры эмиссии запаздывал относительно максимума температуры на время менее 2 мин.

Если считать, что вспышка и КВМ черпают энергию из одного резервуара, то это время запаздывания можно рассматривать, как характерное время ускорения КВМ – существование дополнительного притока энергии, Возможный разброс времени ускорения КВМ следует из теоретических оценок максимальной величины ускорения КВМ, значений его минимальной и максимальной скорости. Ограничение по высоте определяет необходимое магнитное поле для реализации максимальной скорости и ускорения, которые ограничены локальной скоростью Альфвена. Сравнения оценок и наблюдений показывает, что необходимая длительность ускорения при его максимальной величине для реализации межпланетного КВМ была достигнута только в событии SOL2017-09-06T11:53 X9.3.

Оценку минимальной величины равномерного ускорения и, соответственно, максимальной его длительности дает сшивка аппроксимации наблюдений положения и скорости КВМ по данным LASCO C2 с зависимостями его положения и скорости от времени при равноускоренном движении. Считая, что КВМ стартовал с R_0=1.25R_S в момент максимума температуры, для SOL2017-09-06T11:53 X9.3 получаем: ускорение 2.0 км/с^2 при длительности ускорения 790 с, начало равномерного движения со средней скоростью 1571 км/с на 2.1R_S. При больших величинах начального ускорения становится неверным предположение о равноускоренном движении, за быстрым импульсным ускорением должно следовать слабое длительное ускорение. У нас нет возможности проверить в этом событии сценарий неравномерномерного ускорением, так как отсутствовали наблюдения КВМ на <3.93 R_S.

Работа поддержана субсидиями по темам «Плазма» (АБС и АМС) и «Энерговыделение» (ИЮГ), грантом РФФИ – 19-02-00264 (ЮИЛ).

О СВЯЗИ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ПРОТОНОВ ДО ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ С ПРОЦЕССОМ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЕ ЭРУПТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ.

Курт В.Г.[1], Юшков Б.Ю.[1], Галкин В.И[2].

1.НИИЯФ МГУ, 2.Физический ф-т МГУ г. Москва, Россия, vgk@ srd.sinp.msu.ru

Ускорение частиц до высоких энергий и нагрев плазмы в импульсной фазе солнечной вспышки представляют собой следствия магнитного пересоединения в короне. Гамма-излучение от энергичных ионов и электронов было обнаружено и подробно измерено до энергии 100 МэВ-ГэВ с 1980 года в импульсной фазе не более чем в 10 эруптивных событиях. Эти измерения уникальны, они предоставляют нам единственное прямое (хотя и вторичное) знание о свойствах ускорителей, действующих в солнечной вспышке. Мы пересматриваем наши текущие знания о высокоэнергичном излучении, сопоставляя изменения его состава и спектра с временным поведением скорости магнитного пересоединения в короне $\dot{\varphi}(t)$. Парадигма сегодняшнего дня - «мощность энерговыделения пропорциональна скорости магнитного пересоединения», опирается в основном на результаты сопоставления максимальных потоков HXR с E<100 кэВ, SXR и dI_{SXR}/dt с максимальными значениями $\dot{\varphi}(t)$. Сопоставления временного поведения $\dot{\varphi}(t)$ с этими характеристиками энерговыделения малочисленны и не дают однозначный ответ. Сопоставление эволюции скорости магнитного пересоединения с поведением гамма-излучения Eγ≥500 кэВ ранее не проводилось. Это излучение создается не только релятивистскими электронами, но и протонами с энергиями >10 МэВ за счет возбуждения γ-линий. Мы исследовали импульсную фазу нескольких эруптивных вспышек с целью выявить связи между эволюцией скорости магнитного пересоединения $\dot{\varphi}(t)$ и эффективностью ускорения электронов и протонов до высоких энергий.

Мы сопоставили изменения спектра высокоэнергичного гамма-излучения с $\dot{\varphi}(t)$ в нескольких дисковых событиях, измеренных на КОРОНАС-Ф/СОНГ и *Fermi*/LAT. Основные экспериментальные факты.

1. Короткие, длительностью 10-15 с, всплески тормозного гамма-излучения электронов с энергиями вплоть до 60 МэВ было измерены в самом начале импульсной фазы во вспышке 28-10-2003 г. (КОРОНАС-Ф/СОНГ). Потоки HXR с E<100 кэВ, SXR и dI_{SXR}/dt свидетельствуют о том, что энерговыделение было невелико. Временное разрешение пространственных измерений в линии Hα, так и в EUV не позволяет отслеживать такое быстрое изменение магнитной структуры, которое обеспечивало бы столь эффективный процесс ускорения.
2. Мы подтвердили ранее известный факт об ускорении протонов до энергий 10-60 МэВ, отвечающих за возбуждение узких γ-линий, одновременно с ускорением электронов низких энергий, в самом начале импульсной фазы вспышки.
3. Гамма-излучение от распада пионов, не наблюдалось в первых эпизодах ускорения независимо от чувствительности детектора и длительности импульсной фазы.
4. Основное энерговыделение вспышки начинается только после того момента, когда $\dot{\varphi}(t)$ достигает максимума и начинает резко падать. Процесс пересоединения продолжается затем довольно долго. Гамма-излучение от распада пионов возникает в это же время, за 1-3 минуты достигает максимума и затем спадает, следуя за временным ходом скорости пересоединения,

В качестве иллюстрации мы представляем подробное исследование уникальной вспышки 28-10-2003 г. Эта вспышка четко показывает, что основное энерговыделение начинается только после прохождения максимума скорости пересоединения магнитного потока. Величины коронального электрического поля, потоков тормозного излучения при энергиях ~ 60 МэВ, и гамма-излучения от распада пионов были самыми высокими значениями, из когда-либо наблюдавшихся во вспышках на Солнце.

УСЛОВИЯ УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ДО ЭНЕРГИЙ БОЛЕЕ 100 кэВ В КОРОНАЛЬНОМ ИСТОЧНИКЕ

Мерзляков В.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, mvl@izmiran.ru

Рассмотрена ситуация с ускорением частиц в корональной области во время солнечной вспышки. Предложено объяснение наблюдаемому ускорению электронов до энергий > 100 кэВ в рамках новой концепции солнечной вспышки [1]. Предполагается, что ускорение частиц происходит в окрестности магнитной особенности X-типа. Эту особенность создают зоны локально усиленного магнитного поля по разные стороны нейтральной линии активной области. Вследствие магнитной переменности таких локальных зон возникает вихревое электрическое поле. Анализ условий в корональной области показал, что на процесс ускорения электронов накладывает ограничение неустойчивость Драммонда-Розенблюта. При такой неустойчивости эффективная частота столкновений электронов равна гирочастоте протонов $\approx 10^4 B$. В случае типичных условий в корональной области ускорения магнитная напряженность B~10 Гс и величина электрического поля E~10^{-3} СГС. И в этой ситуации электроны приобретают энергию до ~10 кэВ. Если же в корональной области напряженность магнитного поля окажется на порядок меньше B~1 Гс, тогда возможно ускорение электронов до энергии ~1МэВ.

1. Мерзляков В.Л. // Труды конференции "Солнечная и солнечно-земная физика-2020". 2020. ГАО РАН. С.-Петербург. С. 209.

УСКОРЕНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ И ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ДЛИТЕЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, irina.2014.irina@mail.ru

Солнечные вспышки с длительным γ-излучением являются предметом пристального изучения (например, [1]). Обнаружение явного сходства в причинно-следственных связях хотя бы у одной пары таких событий помогает уточнить наши представления о его природе. Из списка, указанного в работе [1], мы рассмотрели две эруптивные вспышки, сопровождавшиеся длительным γ-излучением (> 100 МэВ, *Fermi* LAT) – это M3.7 и X2.8 балла по классификации GOES, зарегистрированные 07 марта 2011 года [2] и 13 мая 2013 года [3].

Наблюдения X-вспышки 13 мая в оптическом диапазоне (SDO_AIA) позволили оценить величину ускорения коронального выброса массы (КВМ) в начале подъема магнитного жгута (~4.88 км/с^2 на расстоянии ~1.15 радиуса Солнца от центра диска [3]) на фазе роста мягкого рентгеновского (SXR-) излучения. Наиболее значимые проявления ускорения заряженных частиц (жесткое рентгеновское (HXR-) излучение: RHESSI и ACS SPI; γ-излучение: *Fermi* LAT) наблюдались на фазе SXR-спада. Когда КВМ достиг скорости ~ 2190 км/с на расстоянии 6 радиусов (SOHO LASCO_C2/C3) [3]. Иными словами, нетепловые процессы наблюдались на постэруптивной фазе вспышки. Таким же образом, на фазе роста происходило ускорение КВМ и в событии M3.7 (с постепенным ростом и спадом SXR-излучения в каналах GOES), а эффективное ускорение заряженных частиц – после SXR-максимума. Это была первая вспышка с длительным γ-излучением, зарегистрированная *Fermi* LAT [2].

Мы считаем, что ускорение протонов, с которым, по-видимому, связано длительное γ-излучение, в обоих случаях происходило на постэруптивной фазе вспышки. И эта работа представляет собой еще один аргумент в пользу длительного вспышечного стохастического ускорения протонов [2, 4].

Работа, выполненная Григорьевой И.Ю. (ГАО РАН), осуществлена за счет субсидии программы «Энерговыделение», Струминским А.Б. (ИКИ РАН) – за счет субсидии программы «Плазма».

1. Share, G.H., Murphy, R.J., White, S.M. et al. // Astrophysical J. 2018. V. **869**. P. 182.
2. Ackermann, M., Ajello, M., Albert, A. et al. // Astrophysical J. 2014. V. **787**. P. 15.
3. Gou, T., Veronig, Astrid M., Liu, R. et al. // Astrophysical J. Let. 2020. V. **897(2)**. id. L36.
4. Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М. // Физика Плазмы 2020. Т. **46(2)**. С. 139.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ СОЛНЕЧНЫМИ КОСМИЧЕСКИМИ ЛУЧАМИ, РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ II ТИПА И КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ ВЕЩЕСТВА

Базилевская Г.А.[1],*, Логачев Ю.И.[2], Дайбог Е.И.[2], Власова Н.А.[2], Гинзбург Е.А.[3], Ишков В.Н.[4,5], Лазутин Л.Л.[2], Нгуен М.Д.[2], Сурова Г.М.[2], Яковчук О.С.[2]

[1]*ФИАН, г. Москва, Россия**bazilevskayaga@lebedev.ru*

[2]*НИИЯФ, г. Москва, Россия*

[3]*ИПГ, г. Москва, Россия*

[4]*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

[5]*ГЦ РАН, г. Москва, Россия*

Изучение условий ускорения заряженных частиц, связанных с взрывным энерговыделением на Солнце, демонстрирует их большое разнообразие. Характеристики сопутствующего гамма-, рентгеновского и радиоизлучения, а также параметры корональных выбросов вещества значительно отличаются от события к событию. Информация об этих характеристиках накапливается в Каталоге солнечных протонных событий 24-го цикла солнечной активности. Считается, что радиоизлучение II типа свидетельствует о распространении ударной волны в короне Солнца. В ряде работ найдена тесная связь между радиоизлучением II типа и корональными выбросами вещества (КВВ), которые вносят вклад в ускорение частиц высоких энергий – солнечных космических лучей (СКЛ). Однако связи между СКЛ, вспышками, радиоизлучением II типа и КВВ неоднозначны. Статистические исследования, охватывающие результаты наблюдений, собранных в Каталогах СКЛ за 23 и 24 циклы солнечной активности, направлены на поиски наиболее часто реализуемых ситуаций, приводящих к появлению высокоэнергичных частиц в межпланетной среде.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00264.

ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ: ТЕКУЩИЙ ПРОГРЕСС И ВЫЗОВЫ

Садыков В.М.

Университет Штата Джорджия, г. Атланта, США, vsadykov@gsu.edu

Прогноз солнечных вспышек и протонных событий является одной из приоритетных задач физики Солнца и Солнечно-Земных связей. Постоянно увеличивающиеся объемы и качество наблюдательных данных, а также прогресс в разработке методов машинного и глубокого обучения и необходимых вычислительных мощностей, позволяют тестировать различные алгоритмы машинного обучения для прогноза солнечных событий. Несмотря на это, операционные центры прогноза солнечной активности все еще используют статистические модели и корректировки экспертов.

В данном докладе представлен краткий субъективный обзор текущего состояния проблемы прогноза солнечных событий (вспышек и протонных событий). В начале доклада проиллюстрирован статистический прогноз таких событий, скорректированный экспертами и применяемый на данный момент в Центре Предсказаний Космический Погоды NOAA (SWPC NOAA, США). Далее рассмотрено предсказание вспышек и протонных событий с помощью машинного обучения на основе свойств (дескрипторов) активных областей и предшествующей активности Солнца, и приведены результаты из работ автора. Также приведены примеры успешного применения методов глубокого обучения в задачах прогноза солнечных событий.

В завершении доклада разобраны наиболее значимые, на взгляд автора, проблемы прогноза солнечных вспышек и протонных событий, а именно: 1) сложность сравнения результатов прогноза из разных источников (статей и центров прогноза); 2) зависимость вспышечной активности от цикла и его фазы; 3) использование сильно скоррелированных дескрипторов для машинного обучения; 4) проблема идентификации родительской активной области для конкретного события; 5) систематические искажения дескрипторов магнитного поля от центра к лимбу; 6) зависимость метода и интерпретации обучения от конечной цели прогноза. Доклад подчеркивает, что применение машинного обучения для прогноза солнечных событий является интенсивно развивающейся научной областью. Однако для того, чтобы разработанные алгоритмы были использованы в операционных целях, необходимо более аккуратное сравнение с текущими операционными прогнозами.

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВСПЫШКАХ: МИКРОВОЛНОВОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ

Алтынцев[1] А.Т, Мешалкина[1] Н.С., Флейшман[2] Г.Д., Лысенко[2] А.Л.

[1] *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, altyntsev@iszf.irk.ru*
[2] *ФТИ им. А.Ф.ИОФФЕ, РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

Исследовано первичное энерговыделение в начальной фазе вспышки 4 августа 2011 г. (M9.3). Во время эрупции волокна перед импульсной фазой вспышки наблюдалась уникальная последовательность синхронных широкополосных субпиков в жестком рентгеновском и микроволновом излучении. Детально проанализированы наблюдения в различных диапазонах излучения начального этапа этой вспышки. Задачей исследования являлись количественные оценки физических параметров источников субпиков – размеры, магнитные поля, значения плотности и т.д. с целью сужения списка возможных механизмов ускорения.

На световых кривых различных частот (энергий) микроволнового и рентгеновского излучения наблюдается соответствие между субпиками. Продолжительность субпиков в диапазоне энергий фотонов 26-293 кэВ в пределах 0,7–1,8 сек, а времена подъема и спада субпика сопоставимы. Следовательно, захват электронов в петли мал, и электроны релаксируют в хромосферных основаниях петли.

Спектральные измерения показали, что появление субпиков вызывалось импульсами электронов со степенным спектром $(0{,}8\text{-}3{,}2)\text{x}10^{37}E^{-3.4}$ эл/(кэВ с). Анализ субпиков, наблюдавшихся в разных каналах Fermi/GBM и данных на разных радиочастотах, подтвердил предположение о кратковременной импульсной инжекции ускоренных электронов на расстоянии около 20 Мм от места высыпания электронов в хромосферу.

Моделирование показало, что для появления наблюдаемых микроволновых субпиков необходимо увеличение в источнике числа ускоренных электронов на 30–50%. Время их удержания во вспышечных петлях не превышает долей секунды, что указывает на пучковый характер углового распределения ускоренных электронов.

Параметры плазмы и магнитного поля во вспышечных петлях оценены с помощью трехмерного моделирования. Низкочастотное микроволновое излучение на 5,7 ГГц генерировалось в протяженных петлях, а высокочастотное на 17 и 34 ГГц, связанное с рентгеновским излучением, излучалось в коротких северных петлях. Размер области ускорения < 10 Мм. Оценка напряженности ускоряющего электрического поля ~0,1 В/м, что, по крайней мере, на порядок выше, чем величина поля Драйсера.

Результаты наблюдений практически исключают популярные механизмы стохастического ускорения, которые должны генерировать, в основном, изотропные распределения ускоренных частиц за счет эффективного углового рассеяния частиц на турбулентности. В данном событии электроны быстро ускорялись до нескольких сотен кэВ вдоль магнитного поля (время ускорения короче 50 мс), и столь высокий темп трудно объяснить в рамках стохастических ускорительных моделей.

Можно предполагать, что в области ускорения формируется турбулентная среда с множеством мест пересоединения в области вспышечного каспа, где случайным образом формируется множество токовых слоев. Известно, что при традиционном ускорении в одном токовом слое трудно получить спектр нетепловых электронов со степенным законом. В случае турбулентного пересоединения со многими токовыми слоями статистика ускоряющих электрических полей может следовать статистике электрических полей в доступных токовых слоях.

ВЕРОЯТНОСТЬ ВЫХОДА ФОТОНА В УСЛОВИЯХ ЗВЁЗДНЫХ АТМОСФЕР

Белова О.М., Бычков К.В.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, whitecanvas05122010@mail.ru

В рамках модели Бибермана–Соболева–Холстейна проведены численные расчёты вероятности выхода фотона из неподвижного однородного плоско–параллельного слоя, параметры которого соответствуют звёздным атмосферам. Вычисления выполнены для профилей Доплера, Лоренца, Фойгта и свёртки доплеровского и хольцмарковского контуров. В случае контуров Доплера, Лоренца, Хольцмарка расчёты сопоставлены с известными в литературе асимптотическими приближениями [1], а для контура Доплера также сопоставлены с аналитической аппроксимаций [2]. Для профиля Фойгта уточнена известная [3] аналитическая аппроксимация численных расчётов, выполненных без усреднения вероятности по угловым переменным. Наконец, для свёртки доплеровского и хольцмарковского профилей получена аналитическая аппроксимация, ранее не опубликованная в литературе.

1. Нагирнер Д.И., Лекции по теории переноса излучения, изд-во Санкт-Петербургского университета, 2001.
2. Apruzese J.P. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 1980. V. 2**3.** No. 5. P. 479.
3. Apruzese J.P. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer 1985. V. **34.** No. 5. P. 447.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОФИЛЯ ХРОМОСФЕРНЫХ ЛИНИЙ В СПОКОЙНЫХ И АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА

Березин И.А., Тлатов А.Г.

Кисловодская Горная Астрономическая Станция ГАО РАН, Россия, iberalex@yandex.ru

В докладе представлен анализ серий наблюдений полного профиля линии Н-альфа в солнечной хромосфере. Анализ основан на данных патрульного телескопа-спектрогелиографа, разработанного на Кисловодской Горной Астрономической Станции и функционирующего с 2015 г. Телескоп ведет непрерывные наблюдения Солнца со временем сканирования диска около одной минуты. Рассмотрена проблема измерения параметров линии Н-альфа с применением различных методов аппроксимации профиля. Исследована возможность определения допплеровского смещения в линии Н-альфа с помощью свёрточных искусственных нейронных сетей. Также рассмотрены характерные формы профиля Н-альфа в активных областях Солнца и эволюция профиля линии в процессе формирования солнечной вспышки на примере вспышки X-класса.

Работа выполнена при частичной поддержке Программы ОФН РАН 12

ПАРАМЕТРЫ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ, КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ, И РАДИО ВСПЛЕСКОВ II ТИПА В 23 И 24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Биленко И.А.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, bilenko@sai.msu.ru

Согласно современным представлениям радио всплески II типа (РВII) генерируются магнитогидродинамическими ударными волнами, распространяющимися в солнечной короне и межпланетной среде, и считаются проявлением ударных волн в радио диапазоне. Наблюдения свидетельствуют, что РВII могут сопутствовать совершенно разным явлениям солнечной активности: вспышкам всех классов, корональным выбросам массы (КВМ) всех типов, они могут регистрироваться при взаимодействии двух КВМ, при взаимодействии ударных волн со стримерами, с событиями солнечных энергичных частиц. Однако проводимые в последнее время исследования показали, что ни сами по себе вспышки, КВМ, ударные волны, ни их параметры или их сочетания не являются определяющими факторами для генерации РВII. Было установлено, что хотя число РВII выше в максимуме солнечной активности, а в минимуме они практически не наблюдаются, они плохо коррелируют с пятенной активностью.

В данной работе изучается роль среды, в которой распространяются ударные волны, на условия необходимые для генерации РВII. Детально анализируются зависимости числа и параметров РВII и связанных с ними КВМ от таких параметров плазмы как напряженность магнитного поля, плотность и температура плазмы на расстояниях регистрации РВII. Также получены зависимости параметров КВМ сопровождающихся РВII от значений альфвеновской скорости, числа Маха и их циклические вариации в 23 и 24 циклах. Рассмотрены различия параметров КВМ и РВII в 23 и 24 циклах.

Полученные результаты свидетельствуют, что параметры плазмы среды являются одним из важнейших факторов определяющих условия которые способствуют генерации РВII.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ»

Квашнин А.А., Филиппов М.В., Логачёв В.И., Махмутов В.С., Калинин Е.В., Стожков Ю.И., Максумов О.С., Орлов А.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, mfilippov@frtk.ru

В данной докладе представлены результаты этапа расчета научной аппаратуры «СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ» [1]. Проведены первичные расчеты оптического тракта (телескопа). С помощью компьютерного моделирования были определены оптимальные параметры телескопа.

Для проверки расчетов был разработан и изготовлен одноканальный макет, включающий в себя телескоп Кассегрена с системой юстировки и корпус, позволяющий осуществлять перемещения детектора терагерцового излучения. При изготовлении макета была отработана технология шлифовки зеркал. Были произведены подтверждающие расчеты испытания телескопа в видимом оптическом диапазоне.

В докладе приведены методика расчетов, описание компьютерной модели телескопа, методика проведения и результаты экспериментальной проверки вычисленных значений параметров телескопа научной аппаратуры «СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ».

1. Е. В. Калинин , М. В. Филиппов, В. С. Махмутов, О. С. Максумов, Ю. И. Стожков, А. А. Квашнин, Г. Н. Измайлов, В. В. Озолин. // Космические исследования, 2021, Т. 59, № 1, С. 3-8.

ВСПЛЫТИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ ПЕРЕД ВСПЫШКАМИ

Куценко А.С., Абраменко В.И., Плотников А.А.

КрАО РАН, п. Научный, Крым, Россия, alex.s.kutsenko@gmail.com

Наиболее мощные солнечные вспышки происходят в активных областях со сложной магнитной структурой. Так, наблюдения показывают, что 90 процентов вспышек класса X производятся активными областями с δ-конфигурацией согласно классификации Хейла (тени противоположных магнитных полярностей находятся в общей полутени). По этой причине вопрос появления таких сложных магнитных структур вызывает интерес.

Анализ эволюции активных областях с δ-структурой выявил четыре возможных механизма их формирования [1]. Два из них подразумевают одновременное всплытие нескольких магнитных жгутов, ориентированных особым образом друг относительно друга. Один их механизмов – всплытие нового магнитного потока вблизи уже сформировавшейся «старой» магнитной структуры. Четвертый сценарий – всплытие магнитного жгута с сильной скрученностью магнитных силовых линий, что приводит к возникновению неустойчивости (kink instability), деформации оси жгута и формированию δ-структурой при сильном сближении пятен противоположных полярностей. В последнем случае теоретические модели предсказывают очень высокую скорость нарастания магнитного потока в формирующейся всплывающей активной области (например, [2]).

В данной работе мы проводим исследование формирования вспышечно-продуктивных активных областей, фокусируясь на анализе всплытия магнитного потока перед возникновением сильных вспышек. В частности, мы хотим установить, как часто причиной сильных вспышек становится всплытие нового магнитного потока вблизи сформировавшейся магнитной структуры, а также выяснить, наблюдается ли при всплытии магнитных δ-структур повышенные значения скорости нарастания магнитного потока.

Для исследования мы используем наблюдения инструментов SOHO/MDI и SDO/HMI, охватывая временной интервал с 1996 по 2020 гг. Проанализировано более 50 активных областей, в которых наблюдались вспышки класса M5.0 и выше.

Предварительные результаты показывают, что наиболее часто возникновение сильных вспышек предваряется всплытием нового магнитного потока вблизи уже существующей стабильной биполярной или униполярной структуры, в то время как всплытие сложной, вспышечно-продуктивной структуры в областях невозмущенной фотосферы наблюдается значительно реже.

В докладе также приводятся результаты анализа скорости нарастания магнитного потока во вспышечно-проудктивных активных областях.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 19-72-00027.

1. Toriumi S., Wang H. // Living Reviews in Solar Physics 2019 V. 16, no. 1
2. Knizhnik K.J., Linton M.G., DeVore C.R. // The Astrophysical Journal 2018, V. 864, P. 89.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ НА ЭНЕРГИЯХ ВЫШЕ 1 МэВ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ KONUS-WIND В 1994-2017 ГГ.

Лысенко А.Л., Флейшман Г.Д., Фредерикс Д.Д., Голенецкий С.В., Олейник Ф.П., Свинкин Д.С., Уланов М.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия, alexandra.lysenko@mail.ioffe.ru

Излучение солнечных вспышек на энергиях выше 1 МэВ наблюдается относительно редко, в литературе за всё время наблюдений описано менее сотни таких событий. Это высокоэнергичное излучение обусловлено торможением релятивистских электронов и ядерными реакциями, в которые вступают ускоренные ионы с ионами плазмы солнечной атмосферы. Таким образом, гамма-излучение солнечных вспышек — один из основных методов диагностики ускоренных ионов. Эксперимент Konus-Wind продолжается с 1994 г. по настоящее время и, благодаря местонахождению в межпланетном простанстве, проводит наблюдения Солнца практически непрерывно на протяжении более 26 лет. За это время Konus-Wind зарегистрировал 93 солнечные вспышки на энергиях выше 1 МэВ. Мы представляем каталог этих событий, их характеристики в гамма- и жёстком рентгеновском диапазонах.

ИЗУЧЕНИЕ 3D СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В МОДЕЛЬНОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЦА

Нечаева А.Б., Зимовец И.В., Шарыкин И.Н., Chen F.

ИКИ РАН РАН, г. Москва, Россия, nechaeva.ab@phystech.edu

В настоящее время определение 3D структуры электрического тока в активных областях (АО) Солнца экспериментально затруднено. Это возможно или в очень редких случаях, или с применением алгоритмов экстраполяции магнитного поля, которые могут внести в данные определённые физические допущения и вычислительные артефакты. Поэтому в этой работе используются данные 3D МГД моделирования одной АО с помощью численных кодов MURaM [1] с распространением в солнечную корону.

Эти модельные данные позволили получить информацию о структуре электрического тока и его отношении с силовыми линиями магнитного поля в АО. В частности, получено указание на неприменимость аппроксимации горизонтальной составляющей электрического тока горизонтальной составляющей градиента вертикального магнитного поля в АО [2] в рамках модели. Также получен результат о преобладающей горизонтальности электрического тока на фотосфере: в большинстве пикселей модельной АО горизонтальная составляющая больше, чем вертикальная, что согласуется с некоторыми результатами, полученными ранее [3].

Полученные результаты исследования модельной АО могут быть полезны для дальнейшего понимания физических процессов, происходящих в реальных АО Солнца.

1. Chen F., Rempel M., Fan Y. // The Astrophysical Journal 2017. V. **846.** P. 26.
2. Fursyak Yu.A., Abramenko V.I. // Astrophysics 2017. V. **60**, P. 544.
3. Puschmann K.G., Ruiz Cobo B., Martínez Pillet V. // The Astrophysical Journal Letters 2010. V. **721**. P. L58.

СПЕКТРЫ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ ВСПЫШЕЧНО-ПРОДУКТИВНЫХ СТРУКТУР МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ МНОГОАЗИМУТАЛЬНЫХ РАДИНАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА РАТАН-600.

Овчинникова Н.Е.

СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, n.e.ovchinnikova@gmail.com

Предложен новый подход к анализу многоазимутальных наблюдений Солнца во всем диапазоне частот действующего спектрополяриметрического солнечного комплекса (3–18 ГГц) РАТАН-600 в рамках параллельного факторного анализа [1] многоволновых данных. В анализ возможно включение данных, полученных при помощи нового приемного комплекса диапазона 1–3 ГГц, после ввода его в эксплуатацию [2]. Метод позволяет одновременно получать спектры высокого разрешения всех отдельных источников радиоизлучения на Солнце для каждого момента времени на протяжении всего периода их наблюдения, что дает возможность отследить начало развития вспышечного процесса по данным наблюдений Солнца на РАТАН-600. Результаты согласуются с данными расчетов вспышечно-продуктивных структур магнитного поля в местах срыва магнитного потока [3, 4].

Метод позволяет также производить независимую калибровку данных, полученных на солнечном комплексе, по спектральной плотности потока фонового радиоизлучения (т.н. «спокойного Солнца») при отсутствии возможности калибровки по источникам. Двумерные диаграммы направленности антенны на всех длинах волн рассчитываются в приближении физической оптики. Выделение фонового излучения производится посредством тензорного разложения массива данных, имеющего единственное решение [1]. В массив включаются результаты наблюдений Солнца в период минимальной активности и результаты наблюдений, анализируемые в данный момент. Аналогично происходит выделение радиоизлучения отдельных источников в активных областях.

1. Bro R. // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 1997. V. **38**. No. 2. P. 149.
2. Lebedev M.K., Ripak A.M., Bogod V.M. // Proceedings of the All-Russian Conference “Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century”, Nizhny Arkhyz, Russia, September 21–25, 2020. P. 413.
3. Shuhong Yang et al. // The Astrophysical Journal Letters 2017 November 10. V **849**. No. 2. P. L21.
4. Aiying Duan et al. // The Astrophysical Journal 2019 October 10. V **884**. No. 1. P. 73.

ИНВЕРСИЯ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ В МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ МИЛНА-ЭДДИНГТОНА С ПОМОЩЬЮ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Плотников А.А.[1], Князева И.С.[2], Медведева Т.В.[2]

1) Крымская астрофизическая обсерватория РАН, plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

2) Санкт-Петербургский государственный университет

Развитие спектрополяриметрических исследований позволило получать данные о пространственном распределении параметров солнечной атмосферы с высокой точностью. Вместе с тем, растущие пространственное и спектральное разрешение приводят к значительным вычислительным и, как следствие, временным затратам на решение обратной задачи т.н. «классическими» методами оптимизации.

Альтернативным подходом может служить применение методов машинного обучения, в частности, нейронных сетей. В данном случае аппроксимация искомых зависимостей простыми функциями позволяет получить значительный выигрыш в скорости вычислений.

В качестве выборки для обучения были применены данные инструмента Hinode/SOT/SP и их инверсия пакетом HAO/MERLIN. Данный инструмент ведет непрерывные наблюдения с 2008 года. Это позволяет получить большой набор данных, что положительно сказывается на точности инверсии. Для снижения зависимости от особенностей инструмента, вместо исходных спектрополяриметрических данных для обучения применялись их искусственно сгенерированные аналоги.

Зачастую в подобных работах обучение производится сразу для всего вектора параметров атмосферы. Однако было установлено, что разные параметры обучаются со значительно различающейся точностью. Это приводит к тому, что при одновременном обучении некоторые параметры будут доминировать, что помешает искомой нейронной сети иметь приемлемую точность для других параметров. В данной работе был применен другой подход – обучение и последующие применение набора однопараметрических нейронных сетей.

Данный метод инверсии показывает хорошее качественное согласие с результатами инверсии HAO/MERLIN.

TIME-DISTANCE DIAGRAMS OF TRANSVERSE OSCILLATIONS OF SOLAR FILAMENTS

Smirnova V.V.[1], Jelinek P.[2]

[1]*CrAO RAS, Nauchny, Crimea, Russia, vvsvid.smirnova@yandex.ru*

[2]*University of South Bohemia, České Budějovice,Czech Republic*

Numerical two-dimensional MHD simulation of waves propagation in a double-structured solar filament have shown the existence of transverse oscillations of the filament with periods of 7.4 and 4.2 minutes [1]. Here, the magnetic configuration of a double-structured filament, was represented as a flux function, which was immersed in the solar atmosphere proposed by Avrette and Loeser (2008) [2].

A significant disadvantage of this work [1] is the lack of a description of new observations which would confirm results of the simulation.

In this work, we analyzed time-distance diagrams of the intensity variations of solar filaments observed in the chromospheric line 304 Å with the Atmospheric Imaging Assembly instrument on-board Solar Dynamics Observatory spacecraft. The detailed study of data series of 3 filaments were carried out in order to identify transverse oscillations. Time-distance diagrams have shown the presence of transverse quasi-periodic oscillations of the filaments with periods of 20, 8.2 and 4.1 minutes. The duration of data series ranged from 1.5 to 3 hours, with the cadence of 12 and 24 s.

In contrast to previous studies, where single dense filaments were simulated [3], our results have shown that the model of a double-structured filament with two flux ropes is in good agreement with observations.

1. Jelínek P., Karlický M., Smirnova V.V., Solov'ev A.A. // A&A 2020. V. 637. P. 7.
2. Avrett E. H. and Loeser R. // ApJS 2008. V. 175. P. 229.
3. Zhou Y.-H., Xia C., Keppens R., Fang C., Chen P. F. // ApJ 2018. V. 856. P. 179.

НАГРЕВ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ ПОТОКАМИ ТЕПЛА ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР

Степанов А.В.[1], Зайцев В.В.[2], Кронштадтов П.В.[2]

[1]ГАО РАН, С-Петербург, Россия, astep44@mail.ru; [2]ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия

Определены потоки тепла из горячих магнитных петель и магнитных трубок в окружающую корону [1]. Показано, что горячие магнитные трубки (спикулы II типа) являются более эффективным источником нагрева короны по сравнению с горячими магнитными петлями, так как в последнем случае тепловые потоки в корону существенно ограничены замкнутой структурой магнитного поля. Для компенсации радиационных потерь и потерь на теплопроводность из короны (~ 10^{28} эрг/с) требуется 10^4 горячих спикул, что составляет около 1% от количества спикул, одновременно наблюдающихся на диске Солнца. Основным источником энергии для нагрева корональной плазмы является фотосферная конвекция, генерирующая в основаниях магнитных петель и магнитных трубкок электрические токи ~ 10^{11} – 10^{12} *А*. Диссипация электрических токов повышена из-за ионно-атомных столкновений и связанной с ними проводимости Каулинга. Это приводит к двум важным эффектам – к нагреву плазмы в магнитных структурах до температуры в несколько миллионов градусов и к возникновению потоков горячей плазмы из открытых магнитных трубок в корону. Инжекция горячей плазмы связана с нагревом электрическими токами фотосферных оснований трубок, возрастающим при спорадическом увеличении скорости фотосферной конвекции, например, в результате 5-минутных колебаний или при развитии неустойчивости Релея -Тэйлора. В результате скорость нагрева фотосферных оснований трубок кольцевыми токами начинает превышать радиационные потери, что приводит к скачку градиента давления и возникновению инжекции горячей плазмы из открытого конца магнитной трубки в корону. При этом потоки горячей плазмы из спикул компенсируют потерю корональной массы, 10^9-10^{10} кг/с, уносимой солнечным ветром.

1. Zaitsev, V.V., Stepanov, A.V., Kronshtadtov, P.V. // Solar Phys. 2020, V.295, P.166.

НОРМАЛЬНЫЙ И АНОМАЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА ПРИ ГЕНЕРАЦИИ И ЗАТУХАНИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВИСТЛЕРОВ В УСЛОВИЯХ ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛИ

Филатов Л.В.[1], **Мельников В.Ф.**[2]

[1] *Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, filatovlv@yandex.ru*

[2] *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург*

Быстрые (нетепловые) электроны, инжектированные во вспышечную петлю, генерируют микроволновое и жесткое рентгеновское излучение [1]. Характеристики этих излучений определяются магнитным полем и распределением нетепловых электронов по энергиям и питч-углам в каждой точке петли. Для исследования этих распределений необходимо рассмотреть взаимодействие электронов с частицами плазмы петли и волновыми полями в ней [2,3]. В работе [4] мы рассмотрели, как отразится на распределении нетепловых электронов и их гиросинхротронном излучении их самосогласованное взаимодействие с вистлеровской турбулентостью, заполняющей вспышечную петлю. При этом учитывались только вистлеры, распространяющиеся вдоль петли по направлению магнитного поля. Это справедливо когда плазма внутри вспышечных петель плотнее, чем снаружи, что приводит к волноводному, квазипродольному распространению вистлеров [2]. Вместе с тем, в магнитосферах активных областей возможно существование вспышечных петель, в которых плотность плазмы не отличается заметно от плотности плазмы внешних магнитных трубок. В этом случае вистлеры могут распространяться под большими углами к магнитному полю[3].

Взаимодействие между энергичными электронами и вистлерами, в котором происходит как рассеяние электронов по питч-углам, так и генерация (затухание) самих вистлеров, носит резонансный характер. При этом необходимо учитывать доплеровское смещение частоты излучения движущегося электрона. При продольном распространении вистлеров существенен только нормальный эффект Доплера, тогда как для вистлеров, распространяющихся под большим углом к магнитному полю, значимым может стать и аномальный эффект Доплера.

Целью настоящей работы является рассмотрение модели согласованного резонансного взаимодействия нетепловых электронов с вистлерами, распространяющимися во вспышечной петле под произвольным углом. Мы проводим оценку степени влияния величины этого угла на питч-угловое, энергетическое и пространственное распределения электронов и определяем отличительные особенности, связанные с нормальным и аномальным эффектом Доплера.

Работа выполнена в рамках Государственного задания №0041-2019-0019, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-52-26006.

1. Каплан С.А., Цытович В.Н. Плазменная астрофизика. Наука, М., 1972, -440с
2. Беспалов П.А., Трахтенгерц В.Ю. Альфеновские мазеры, ИПФАН, 1986, -190с.
3. Мальцева О.А., Чернов Г.П. Кинематика и физика небес. тел. 1989. Т.5, №6. С.44-54
4. Filatov L.V., Melnikov V.F. Ge&Ae, 2020, V.60, P.1137

КОНЦЕНТРАЦИЯ БЕССИЛОВОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КОРОНЕ СОЛНЦА И СКРУЧЕННОСТЬ МАГНИТНЫХ ПЕТЕЛЬ

Цап Ю.Т., Степанов А.В., Копылова Ю.Г.

КрАО РАН, пгт. Научный, yur_crao@mail.ru

Рассматривается магнитостатическое равновесие осесимметричных цилиндрических токовых жгутов в условиях солнечной короны. Обсуждается возможность концентрации сильных магнитных полей в нейтрализованных и не-нейтрализованных потоковых трубках, когда азимутальная компонента магнитного поля во внешней области является соответственно равной либо отличной от нуля, при различных значения закрутки магнитных силовых линий Φ. На примере обобщенной бессиловой магнитной конфигураций жгута Голда–Хойла показано что не-нейтрализованные токовые жгуты, в отличие от нейтрализованных, способны обеспечить концентрации магнитного поля вблизи оси трубки в десятки раз превосходящие фоновые значения поля при сравнительно малых углах закрутки ($\Phi < 10\pi$). На основе полученных результатов анализируется происхождение скрученных магнитных полей в короне Солнца.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и гранта РФФИ (№ 20-52-26006).

ХРОМОСФЕРНЫЕ СПИКУЛЫ И СКОРОСТИ В КОРОНЕ

Якунина Г.В.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, yakunina@sai.msu.ru

Представлен краткий обзор результатов наблюдений хромосферных спикул II типа, их связь с фотосферными магнитными полями и возможной роли в переносе энергии и нагреве солнечной короны. Хромосфера очень динамична, неоднородна и изменчива. Спикулы – основные элементы тонкой структуры хромосферы могут играть решающую роль в энергетике внешней солнечной атмосферы и были предложены в качестве источника высокой температуры короны. Образование спикул II типа, по-видимому, тесно связано с процессами магнитного пересоединения в короне. Кратко обсуждаются некоторые трудности, возникающие при интерпретации наблюдений. Крупномасштабные и мелкомасштабные струи и восходящие потоки, наблюдаемые в нижней атмосфере спокойного Солнца и играют важную роль в переносе массы и энергии из плотной хромосферы в корону. Однако их происхождение и связь с динамикой магнитных полей до сих пор недостаточно изучены и исследованы. Спикулы II типа были впервые обнаружены на изображениях Hinode в линии Ca II (2007 г.), показывают скорости (50-150 км $с^{-1}$). Наблюдения спикул II типа с помощью спектрографа IRIS и наземных обсерваторий выявили наличие очень высоких движений порядка 100-300 км $с^{-1}$, измеренных в плоскости неба. Детальная физическая причина и роль в обеспечении массы и энергии короны остаются в значительной степени неизвестными. Связанные с этим трудности в интерпретации солнечных данных в основном возникают из-за ограниченного пространственного разрешения и сложности хромосферы.

Начиная с 1965 г. в ГАИШе проводились исследования движения плазмы в солнечной короне с помощью интерферограмм красной и зеленой корональных линий Fe X 6374Å и Fe XIV 5303 Å во время полных солнечных затмений. Были получены доплеровские скорости в малых объемов короны до 160 км $с^{-1}$, что вызвало некоторую критику, поскольку скорости по наблюдениям не превышали 20-30 км $с^{-1}$. Профили линий имеют сложную форму, что интерпретируется как свидетельство существования в короне множества мелких движущихся объектов. В результате пересмотра ранее полученных профилей линии Fe XIV 5303 Å были оценены значения турбулентных скоростей, В работе представлен краткий обзор турбулентных и упорядоченных движений плазмы в солнечной короне. Анализируются скорости в спокойных корональных областях, корональных петлях, корональных дырах и полости вокруг спокойных протуберанцев. Сделан вывод о том, что различие турбулентности в различных структурных образованиях короны связано с изменчивостью магнитного поля. Исследованы скорости направленных движений для различных структур в короне. По-видимому, турбулентные скорости сравнимы по своим величинам с доплеровскими скоростями, но в то же время они несколько меньше. Исследована связь нетепловых скоростей с характеристиками магнитного поля.

ДИНАМИКА СКОРОСТЕЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ФАЗЕ СПАДА 24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ОДНОВРЕМЕННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА ЧАСТОТАХ 327 И 111 МГЦ

Чашей И.В.[1] , Лукманов В.Р.[1], Тюльбашев С.А.[1], Токумару М.[2]

[1] – *Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН,* chashey@prao.ru

[2] - *ISEE, Nagoya University, Japan*

Представлены результаты сравнения скоростей солнечного ветра, полученных по измерениям межпланетных мерцаний на трехантенной системе Нагойского университета на частоте 327 МГц и одиночной антенне БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Наблюдения охватывают период длительность 6 лет на фазе спада 24 цикла солнечной активности. Использовано более 100 индивидуальных записей компактного радиоисточника 3С 48 и протяженного анизотропного источника 3С 298. Корреляция ежедневных значений скорости составляет около 50 % для источника 3С 48, среднегодовые значения в пределах ошибок совпадают и испытывают и синхронно изменяются в цикле активности. Для источника 3С 298 корреляция около 25 %, имеется систематический сдвиг между среднегодовыми значениями. Обсуждаются возможные причины различия в скоростях для протяженного источника.

Сопоставление данных радиозатменных экспериментов при зондировании околосолнечной плазмы с локальными измерениями характеристик космической плазмы в окрестности Земли.

А.И. Ефимов[1], Л.А. Луканина[1], В.М. Смирнов[1], И.В. Чашей[2], М.К. Бёрд[3,4], М. Петцольд[4]

[1]*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия*
[3]*Институт астрономии им. Аргеландера Боннского университета, г. Бонн, Германия*
[4]*Институт исследования окружающей среды Кёльнского университета, г. Кёльн, Германия*
e-mail: efimov@ms.ire.rssi.ru

Представлены результаты анализа наблюдений происходивших в окрестности Солнца экстремальных событий с их проявлениями в околоземном космическим пространстве. Для наблюдения областей формирования и ускорения солнечного ветра использовались данные о флуктуациях частоты радиосигналов, полученных при проведении радиозатменных экспериментов с помощью космических аппаратов GALILEO, MARS EXPRESS и VENUS EXPRESS. Показано, что после генерации на Солнце потоков возмущенной плазмы на орбите Земли регистрируются увеличения средних значений концентрации заряженных частиц и их вариаций. Показано, что выбросы возмущенной плазмы, зарегистрированные при радиозондировании восточных областей солнечной короны, инициируют появление на орбите Земли максимумов концентрации заряженных частиц (протонов), которые во много раз могут превышать фоновые значения этой характеристики. Формирование этих максимумов происходит двумя путями. В первом случае потоки возмущенной плазмы проходят как через трассу радиосвязи, так и в направлении Земли, и через 3…5 суток достигают ее орбиты, вызывая увеличение концентрации заряженных частиц, которое может быть обнаружено приборами, установленными на борту искусственных спутников Земли (WIND, ACE и др.). В другом случае та же область образования возмущенных потоков плазмы, вращающаяся вместе с Солнцем, продолжает генерировать выбросы корональной массы, и тогда в околоземном пространстве также регистрируются повышенные значения характеристик плазмы с запаздыванием относительно первого случая около четверти периода вращения Солнца, когда эта область находится напротив Земли.

Работа выполнена в рамках Госзадания.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПОТОКА ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ОБЛАСТИ ОВЕРШУТА МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Бородкова Н.Л.[1], **Сапунова О.В.**[1], **Еселевич В.Г.**[2], **Застенкер Г.Н.**[1], **Ермолаев Ю.И.**[1]

[1] *Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия,* nlbor@mail.ru
[2] *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*

По данным плазменного спектрометра БМСВ, установленного на КА СПЕКТР-Р, исследовалась структура течения плазмы солнечного ветра за рампом межпланетной ударной волны. Особое внимание было уделено области овершута, в которой наблюдаются коррелированные, затухающие при удалении от рампа колебания потока ионов и магнитного поля, сформированные двумя популяциями ионов: втекающим солнечным ветром и пучком отраженных вращающихся ионов.

На основании анализа 20 пересечений фронтов межпланетных ударных волн, в которых наблюдались овершуты в величине потока ионов и магнитного поля, было показано, что овершуты образуются не только у сверхкритических ударных волн, но и у тех, у которых числа Маха меньше или приближаются к значению первого критического числа Маха. Получено, что величина овершута возрастает с ростом числа Маха и величины сжатия магнитного поля B_2/B_1.

Получено также, что оценки длины волны колебаний потока ионов и оценки длины области затухания этих колебаний хорошо коррелируют с величиной гирорадиуса захваченных ионов.

Поведение ионов He++ на фронте межпланетной и околоземной ударных волн

Сапунова О. В., Бородкова Н. Л., Застенкер Г. Н., Ермолаев Ю. И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, sapunova_olga@mail.ru

В работе проведено исследование вариаций параметров ионов дважды ионизированного гелия (He++ или α-частицы) на фронте межпланетной и околоземной ударных волн по данным плазменного спектрометра БМСВ, установленного на спутнике СПЕКТР-Р. Высокое временное разрешение спектрометра БМСВ (0.031 с для вектора потока и 1.5 с - для скорости, температуры и концентрации) позволило изучать структуру фронта ударной волны как по измерениям протонной компоненты солнечного ветра, так и по измерениям α-частиц. Получено, что абсолютная концентрация ионов He++ за фронтом межпланетной ударной волны увеличивается, а относительная концентрация ионов He++ падает. Средняя относительная концентрация ионов He++ за фронтом ударной волны оказалась несколько меньше (на ~ 9%), чем в невозмущенной области. Получена хорошая корреляция между изменением относительной концентрации ионов He++ и углом θBn.

Проведено сравнение вариаций абсолютной и относительной концентрации ионов He++ при пересечении фронта межпланетной и околоземной ударных волн.

ВАРИАЦИИ ГЕЛИЯ В РАЗЛИЧНЫХ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЯВЛЕНИЯХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Хохлачев А., Рязанцева М.О., Рахманова Л. С., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, aleks.xaa@yandex.ru

В работе рассматриваются вариации дважды ионизированных ионов гелия (α-частиц) в солнечном ветре. Как правило, повышенное содержание гелия является признаком некоторых крупномасштабных структур солнечного ветра – например, магнитных облаков. Однако мелкомасштабные вариации содержания гелия не всегда указывают на смену типа течения, они могут возникать в результате локальных процессов в плазме.

Исследование основано на корреляционном анализе временных рядов плотностей протонов, гелия и относительного содержания гелия, измеренных на двух космических аппаратах СПЕКТР-Р и WIND, находящихся на значительном расстоянии друг от друга. Рассмотрены измерения прибора БМСВ (СПЕКТР-Р) и приборов SWE, 3DP (WIND). Выделены длительные интервалы с высоким в целом уровнем корреляций между соответствующими измерениями на разных спутниках и проанализированы изменения коэффициента локальной корреляции относительного содержания гелия на коротких подынтервалах. Исследована зависимость уровня локальной корреляции от различных параметров плазмы солнечного ветра и от расстояния между космическими аппаратами в плоскости перпендикулярной линии Солнце-Земля. Определена принадлежность анализируемых интервалов измерений к крупномасштабным типам течений солнечного ветра на основе каталога крупномасштабных явлений ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/ и выявлена связь локального коэффициента корреляции с крупномасштабным типом течения.

Показано, что уровень локальной корреляции зависит от скорости протонов и относительного стандартного отклонения соответствующего параметра и достигает максимальных значений в сжатой плазме перед магнитными облаками, а минимальных – в медленных квазистационарных потоках солнечного ветра и в гелиосферном токовом слое. Также выявлены локальные плазменные неоднородности – области, где существенные изменения содержания гелия наблюдаются только на одном космическом аппарате, и определены их основные свойства. Кроме того, в работе рассмотрены изменения относительного содержания гелия в магнитных облаках и показано, что содержание гелия растёт при увеличении модуля межпланетного магнитного поля и при уменьшении бетта-параметра в ~ 1 млн. км области в центре магнитного облака.

Работа поддержана РФФИ, грант № 19-02-00177.

МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ: НАБЛЮДЕНИЯ, ХАРАКТЕРИСТИКИ, ИСТОЧНИКИ

Кудрявцева А.В., Просовецкий Д.В.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, kudryavtseva@iszf.irk.ru

На изображениях коронографов белого света видны потоки плазмы, перемещающиеся от Солнца – солнечный ветер. Он неоднороден по своей структуре: более яркие и плотные потоки вещества, формируемые стримерами, наблюдаются в экваториальных гелиоширотах, а менее плотные – в полярных областях, где практически всегда существуют корональные дыры. Помимо хорошо идентифицируемых корональных выбросов массы, в потоках солнечного ветра различимы гораздо менее яркие неоднородности, имеющие вытянутую в радиальном направлении форму и размытые края. Такие мелкомасштабные неоднородности наблюдаются постоянно, независимо от гелиошироты и наличия эруптивных процессов на Солнце. Принято считать, что подобные неоднородности трассируют потоки солнечного ветра, не имеют собственной магнитной структуры и распространяются вдоль открытых силовых линий магнитного поля.

Были определены характеристики различных мелкомасштабных неоднородностей в период с 2009 по 2014 год по данным коронографов STEREO на расстояниях до 15 солнечных радиусов. Наблюдаемые неоднородности характеризовались отсутствием явно выраженной магнитной структуры, угловыми размерами ~ 3° и средней скоростью 175 ± 30 км/с (в проекции на плоскость изображения). Исследование частоты появления неоднородностей в полярных областях солнечной короны показало возрастание их количества на фазе роста цикла солнечной активности. Возможные источники неоднородностей определялись в ультрафиолетовом диапазоне по данным космических обсерваторий STEREO и SDO. Полученные результаты согласуются с имеющимися теориями о формировании подобных неоднородностей на границах открытой и закрытой конфигураций магнитного поля.

Работа выполнена в рамках базового финансирования проекта ФНИ II.16.

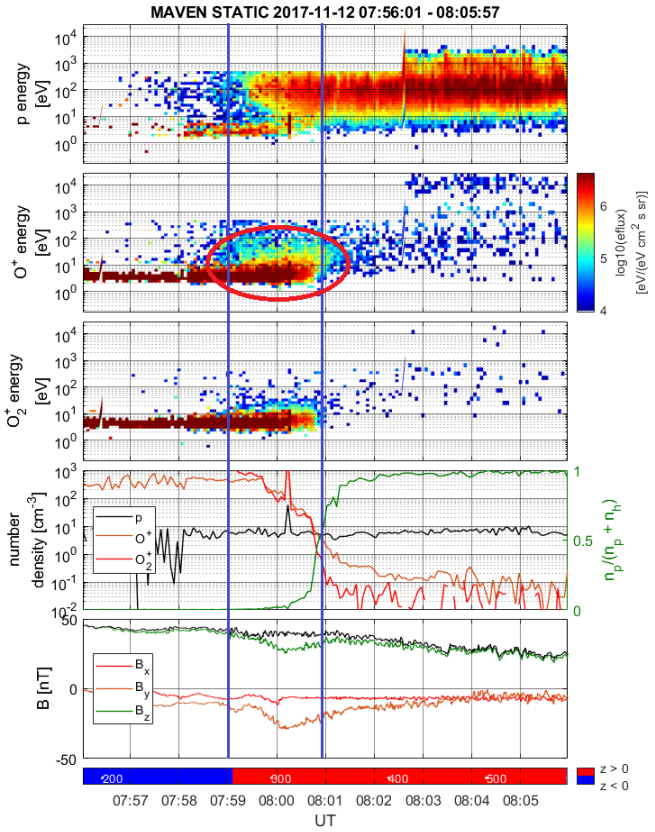
СВОЙСТВА И ИСТОЧНИКИ ДНЕВНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА

Вайсберг О.Л., Шувалов С.Д.

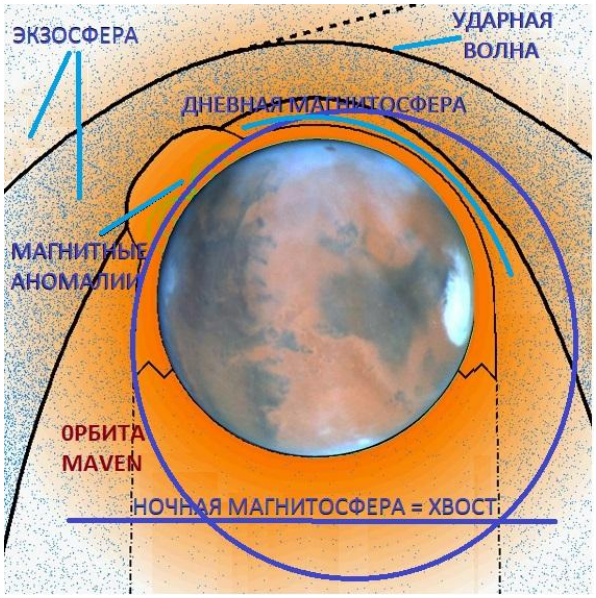
ИКИ РАН, г. Москва, Россия, shuvalov@iki.rssi.ru

Горячая плазменная оболочка Марса была обнаружена на спутниках Марс-2,-3 и -5. С 2014 г. спутник Марса MAVEN позволил детально исследовать эту оболочку. Благодаря этому в ИКИ РАН было установлено постоянное существование тонкой, ~ 200-300 км, магнитно-плазменной оболочки, являющейся дневным продолжением магнитосферы Марса и влияющей на потери плазмы Марсом.

Дневная магнитосфера является промежуточным звеном между внешним потоком горячей солнечной плазмы и холодной плазмой ионосферы внутри. Население магнитосферы состоит из двух компонентов: разогретой и ускоренной плазмы ионосферы и ионов экзосферы, ускоренных индукционным электрическим полем обтекающей солнечной плазмы. Эти ускоренные ионы благодаря большому гиро-радиусу свободно проникают в верхний слой ионосферы и нагревают и ускоряют ионосферные ионы. Это новый процесс образования магнитосфер и их роли в последующих атмосферных потерях.



Магнитосфера (в овале между вертикалями) между ионосферы (слева) и потока разогретой на ударной воле плазмы (справа). Верхние 3 панели – диаграммы время-энергия протонов, O^+ и O_2^+.



Орбита космического аппарата и основные области плазменной оболочки Марса

1. O.L. Vaisberg, S.D. Shuvalov. Properties and Sources of the Dayside Martian Magnetosphere, Icarus, vol. 354, 15 january 2021, 114085.

НАБЛЮДЕНИЕ НЕУСТОЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ В ОБЛАСТИ МЕЖДУ ИОНОСФЕРОЙ И ОБТЕКАЮЩИМ ПОТОКОМ НА ДНЕВНОЙ СТОРОНЕ МАРСА

Ким К.И.[1,2], Шувалов С.Д.[1], Вайсберг О.Л. [1]

(1) ИКИ РАН, г. Москва, Россия

(2) МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

kim.ki@iki.rssi.ru

Процесс взаимодействия солнечного ветра с плазменной оболочкой планет, у которых отсутствует собственное глобальное магнитное поле, например, Марс, отличается от наблюдаемого у планет с развитым магнитным полем. Однако некоторые явления наблюдаются у обоих типов планет. При обтекании солнечным ветром плазменной оболочки планеты формируются неустойчивый слой между обтекающим потоком и ионосферой планеты.

Данная работа посвящена анализу и интерпретации данных ионного спектрометра STATIC и магнитометра MAG спутника MAVEN при пролёте сквозь данный слой. Во время пролета в этом слое зарегистрированы колебания концентрации ионов H+, O+ и O2+. Наблюдаемые структуры предварительно ассоциируются с вихрями неустойчивости Кельвина-Гельмгольца [1]. Основным источником ионов O+ и O2+ в данном слое является верхняя ионосфера Марса. При этом наблюдается ускорение ионов O+ и O2+ от нескольких эВ до кэВ на масштабе времени от нескольких минут.

Проведен анализ угловых спектров H+, O+ и O2+ в приборной системе координат и системе координат, связанной с Марсом. Также с помощью диаграмм компонента скорости – концентрация [2] проверен критерий регистрации вихря неустойчивости Кельвина – Гельмгольца из данных измерений одного спутника.

1. Ruhunusiri, S., et al. (2016), MAVEN observations of partially developed Kelvin-Helmholtz vortices at Mars, *Geophys. Res. Lett.*, *43*, 4763–4773, doi:10.1002/2016GL068926.
2. Hasegawa, H., M. Fujimoto, K. Takagi, Y. Saito, T. Mukai, and H. Re`me (2006), Single-spacecraft detection of rolled-up Kelvin-Helmholtz vortices at the flank magnetopause, J. Geophys. Res., 111, A09203, doi:10.1029/2006JA011728.

ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ И МАГНИТНЫЕ ОБЛАКА

Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Прямушкина И.И., Шлык Н.С., Янке В.Г.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия, abunina@izmiran.ru

В работе изучается влияние магнитных облаков на вариации плотности космических лучей, регистрируемыми нейтронными мониторами, и выделяются статические закономерности, а также характерные особенности магнитных облаков. Рассматриваются 252 Форбуш-эффекта, связанные с выделенными магнитными облаками. Описываются поведение солнечного ветра, параметров космических лучей и геомагнитной активности во время прохождения магнитных облаков мимо Земли. На верхней панели рисунка приведены данные скорости солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, на второй сверху панели – плазменная бета и температурный индекс, на второй снизу панели представлено поведение плотности и анизотропии космических лучей, на нижней панели – изменения геомагнитных индексов (*Kp* и *Dst*). Вертикальная линия – время регистрации SSC.

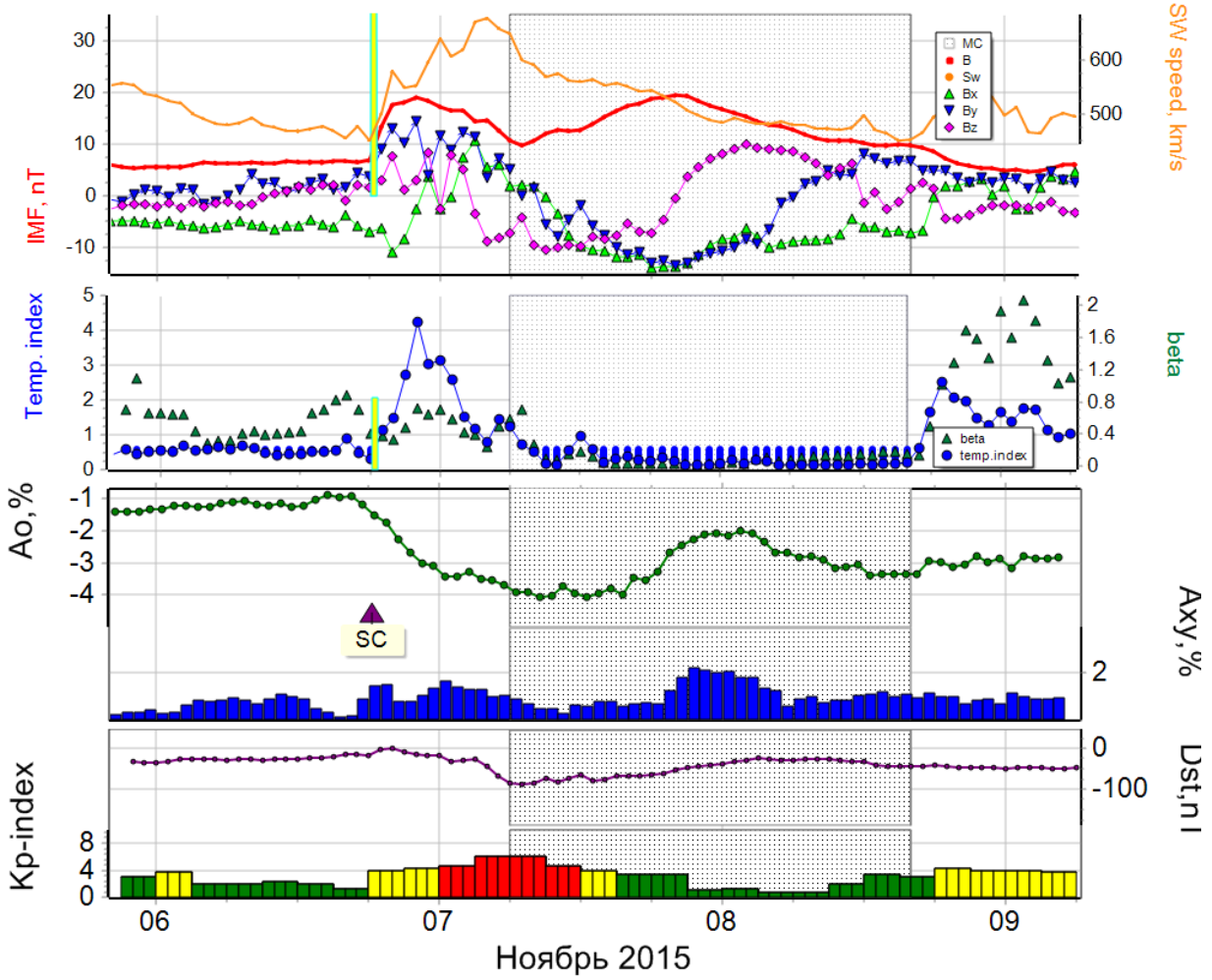


Рисунок. Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности во время прохождения магнитного облака (закрашенная прямоугольная область) мимо Земли 6–8 ноября 2015 г.

Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.А. поддержаны грантом РНФ № 20-72-10023.

АНАЛИЗ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ В ИЮЛЕ - СЕНТЯБРЕ 2012 Г.

Луковникова А.А.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, luk@szf.irk.ru

По данным спутниковых и наземных наблюдений космических лучей на мировой сети станций нейтронных мониторов исследованы Форбуш – эффекты в июле–сентябре 2012 г. методом спектрографической глобальной съемки (СГС). Метод СГС позволяет исследовать вариации жесткостного спектра, анизотропии и изменения жесткостей геомагнитного обрезания за каждый час наблюдений.

Для анализа использовались усредненные за часовые интервалы данные наземных измерений на мировой сети нейтронных мониторов (44 станции), а также данные спутника GOES-13. При совместном анализе данных наземных и спутниковых измерений, в рамках модели модуляции КЛ регулярными электромагнитными полями гелиосферы, получены жесткостные спектры вариаций первичных космических лучей на орбите Земли. Определен вид спектра амплитуд модуляции на разных стадиях исследуемых событий (фазы максимальной модуляции, спада и во время восстановления). Приведены показатели спектров вариаций космических лучей в отдельные периоды исследуемого события.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы Фундаментальных научных исследований II.16. Результаты получены на оборудовании Центра коллективного пользования «Ангара» http://ckp-rf.ru/ckp/3056/ и Уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей (Сеть СКЛ)».

ИССЛЕДОВАНИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ПО ДАННЫМ PARKER SOLAR PROBE

Виноградов А.А.[1,2], **Александрова О.Б.**[2], **Артемьев А.В.**[1,3], **Maksimovic M.**[2], **Васильев А.А.**[1] **Петрукович А.А.**[1], **Bale, S.**[4,5]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, isashavinogradov@gmail.com*

[2]*LESIA Observatoire de Paris, PSL, Meudon, France*

[3]*Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California, Los Angeles, CA, USA*

[4] *Space Sciences Laboratory, University of California, Berkeley, USA*

[5] *Physics Department, University of California, Berkeley, CA, USA*

Турбулентные флуктуации солнечного ветра обладают перемежаемостью – пространственно-неоднородным распределением вихрей, образующих турбулентный каскад. В данной работе мы изучаем перемежаемую турбулентность в солнечном ветре по данным спутниковой миссии NASA/Parker Solar Probe на расстоянии 0.17 а.е. от Солнца. Мы используем совмещенные данные магнитного поля, полученные инструментами FIELDS/Search Coil и Fluxgate Magnetometers, а также данные измерений моментов функции распределения ионов при помощи SWEAP/SPC.

Совмещенные данные измерений магнитного поля имеют разрешение 3.4 мс, что позволяет разрешить широкий диапазон масштабов от инерционного диапазона на МГД масштабах, до суб-ионных масштабов. Мы определяем когерентные структуры при помощи вейвлет анализа как локализованное во времени возрастание плотности энергии колебаний от МГД до кинетических масштабов.

Мы определяем частоту наблюдения когерентных структур, коэффициент заполнения сигнала структурами в зависимости от масштаба, а также топологию магнитного поля. Обсуждается роль когерентных структур в нагреве солнечного ветра.

ВОЗМУЩЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА, СОПРОВОЖДАЕМЫЕ КРАТКОВРЕМЕННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЗНАКА РАДИАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, НАБЛЮДАЕМЫЕ SOLAR ORBITER.

A. Fedorov. P. Louarn, T. Horbury, C. Owen, J. Kasper, S. Bale and the SWA-PAS, MAG, SWEAP, and FIELDS-MAG teams

IRAP UPS CNRS, Toulouse, France, andrei.fedorov@irap.omp.eu

Космическая обсерватория Европейского Космического Агенства Solar Orbiter (SO) была запущена в феврале 2020-го года, и уже в июле месяце этого же года, мы получили первые "in situ" данные, включающие функции распределения протонов, электронов, тяжелых многозарядных ионов и вектор магнитного поля. В это же время Parker Solar Probe (PSP) НАСА подходил к очередному перигелию. 27-го сентября 2020 года оба космических аппарата были расположены примерно на одной и той же Каррингтоновской долготе и на очень близких долготах. Магнитные и плазменные данные, полученные в это время, показывают, что по крайней мере в некоторые моменты, оба аппараты видят плазму, ускоренную в одной и той же корональной дыре. Внутри таких временных интервалов магнитое поле, измеренное SO, испытывает кратковременные перевороты, похожие на "switchbacks", постоянно наблюдаемые PSP. Мы проанализировали возмущения функции распределения протонов внутри этих переворотов, чтобы понять, являются ли эти возмущения "остатками" от "switchbacks", наблюдаемых очень близко от Солнца. В начале своего доклада я постараюсь кратко описать "in situ" приборы, установленные на SO и дать обзор первых данных.

ПАМЯТИ ИГОРЯ СТАНИСЛАВОВИЧА ВЕСЕЛОВСКОГО

Яковчук О.С.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия; olesya@dec1.sinp.msu.ru

В 2020 году ушёл из жизни ведущий специалист в области физики плазмы, главный научный сотрудник НИИЯФ МГУ, доктор физ.-мат. наук, профессор Игорь Станиславович Веселовский (17.12.1940-30.12.2020).

Его областью научных интересов были физика космической плазмы, астрофизика, теоретическая физика, ядерная физика, физика Солнца, физика гелиосферы, физика магнитосферы, физика солнечно-земных связей, биофизика.

Наиболее важные результаты относятся к теории рекомбинации электронов и ионов в частично ионизованной плазме, к кинетической теории динамических плазменных процессов в атмосфере Солнца и солнечном ветре, к теоретическому моделированию межпланетного магнитного поля и развитию методов безразмерного масштабного анализа в космической плазме.

Веселовский И. С. – автор многочисленных научных публикаций высокого уровня: 2 монографии, около 200 статей. На протяжении всей своей научной деятельности активно сотрудничал с учеными многих научных центров как в СССР и РФ, так и за рубежом: в США, Канаде, Бельгии, Франции, Германии, Финляндии.

Веселовский И.С. вёл активную преподавательскую работу в Московском университете. Читал курсы лекций в Международном центре теоретической физики в Триесте (Италия) и в Университете г. Тукуман (Аргентина). Руководил работой студентов, аспирантов, соискателей.

Веселовскому И. С. было присвоено почетное звание «Заслуженный научный сотрудник Московского университета». Был награжден медалью Федерации космонавтики России.

Память об Игоре Станиславовиче Веселовском, крупном ученом и замечательном человеке, навсегда сохранится в сердцах тех, кому выпала удача с ним работать или просто общаться.

ЛОКАЛЬНО УСКОРЕННЫЕ ЭЛЕКТРОНЫ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ – ИХ СВОЙСТВА И ВКЛАД В ОБЩУЮ КАРТИНУ ПИТЧ-УГЛОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

О.В. Хабарова[1, 2]

[1]*ИЗМИРАН г. Москва, г. Троицк, Россия, habarova@izmiran.ru*

[2] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Показано, что в солнечном ветре существуют две популяции энергичных электронов. Часть сверхтепловых электронов рождается в короне Солнца (как и предполагалось ранее), а другая часть возникает вследствие локальных процессов ускорения непосредственно в солнечном ветре [1]. Вторая популяция не была изучена ранее. Между тем, есть основания полагать, что локально ускоренная популяция оказывает значительное влияние на вид питч-углового распределения (ПУР) электронов, часто использующегося для диагностики локального направления магнитного поля. Приведены результаты сравнения PIC-моделирования поведения частиц вблизи пересоединяющихся токовых слоёв и магнитных островов с наблюдениями in situ; показаны примеры типичных паттернов в ПУР, характерных для локального ускорения частиц. Выявлено, что резкие падения интенсивности потока (heat flux dropouts), а также одновременное наблюдение потоков стралов противоположного направления (counterstreaming strahls) в ПУР – естественное следствие присутствия локально ускоренных электронов в плазме солнечного ветра. Это решает проблему трудностей интерпретации этих особенностей как следствия разомкнутости или замкнутости линий магнитного поля исключительно на источник в короне. Кроме того, уменьшение эффективности магнитного пересоединения и уменьшение генерация ускоренных электронов с расстоянием легко объясняет падение удельной плотности стралов при удалении от Солнца.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 20-42-04418.

1. Khabarova O., Zharkova V., Xia Q., and Malandraki O. E., 2020, Counterstreaming strahls and heat flux dropouts as possible signatures of local particle acceleration in the solar wind, The Astrophysical Journal Letters, 894, L12, https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab8cb8

ЭВОЛЮЦИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ ДЫР В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕНОСА СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ

Потапов А.С.

ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru

Одним из важных элементов турбулентности солнечного ветра являются так называемые "магнитные дыры" (МД) — резкие временные понижения напряженности межпланетного магнитного поля [1]. Прослежена эволюция кинетических МД в ходе их переноса солнечным ветром. Использовались 1-с данные магнитометров ACE и Wind во время перемещения КА Wind от магнитосферы в точку либрации L1 на фоне прохождения пяти высокоскоростных потоков. Изучались изменения размера и формы магнитных дыр, наблюдавшихся согласованно сначала на КА ACE, а затем, в результате их переноса потоком ветра, на КА Wind. Было отобрано 15 МД, скорость переноса которых между спутниками отклонялась от расчетной не более чем на 15%. Из них 9 МД относятся к линейному типу магнитных дыр, 5 МД вращательного типа, и еще одна наблюдалась на фоне хаотического поведения компонент ММП [2].

Характер эволюции МД в ходе их переноса был разнообразен — от полного сохранения формы до значительного ее изменения как в сторону углубления дыры и укручения ее фронта, так и в сторону значительного ее расплывания. В двух событиях МД были как бы «законсервированы»: их размер и форма практически не менялись во время переноса на расстояние более 600 тыс. км (рис. 1).

Обсуждается возможное модуляционное воздействие МД на волновые явления в магнитосфере. Намечены пути дальнейшего изучения эволюции магнитных дыр в солнечном ветре.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 19-05-00574.

1. Zurbuchen T.H. et al. // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 16001.
2. Potapov A.S. // Planet. Space Sci. 2020. V. 192. Article 105066.

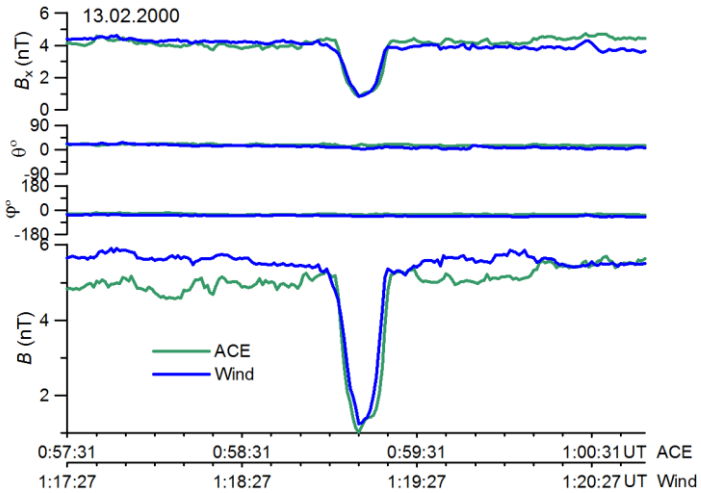


Рис. 1. Линейная (без вращения вектора ММП) магнитная дыра, наблюдавшаяся сначала на ACE, а спустя примерно 20 минут — на КА Wind. Два аппарата находились почти на одном радиальном луче на расстоянии около 670 тыс. км друг от друга.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ВАРИАЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Шлык Н.С., Белов А.В., Абунин А.А., Абунина М.А., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия, nshlyk@izmiran.ru

На основе базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений (FEID) представлен анализ вариаций галактических космических лучей (КЛ) и изменения различных характеристик Форбуш-эффектов, связанных с влиянием на Землю взаимодействующих возмущений солнечного ветра. Рассмотрены случаи парного взаимодействия высокоскоростных потоков из корональных дыр и корональных выбросов массы за период времени с 1995 по 2019 гг., приведен анализ поведения параметров солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и вариаций космических лучей для двух типов взаимодействующих возмущений солнечного ветра.

На рисунке ниже приведен пример поведения некоторых параметров (модуль межпланетного магнитного поля, скорость солнечного ветра, вариации плотности (A_0) и экваториальная составляющая анизотропии (*Axy*) КЛ, геомагнитные индексы (*Dst*, *Kp*)) при взаимодействии выброса корональной массы (CME) и потока из корональной дыры (CH). В данном случае подобное парное взаимодействие возмущений солнечного ветра вызывает усиление эффекта влияния корональной дыры, что проявляется в большем изменении вариаций плотности и анизотропии КЛ и усилении геомагнитной активности.

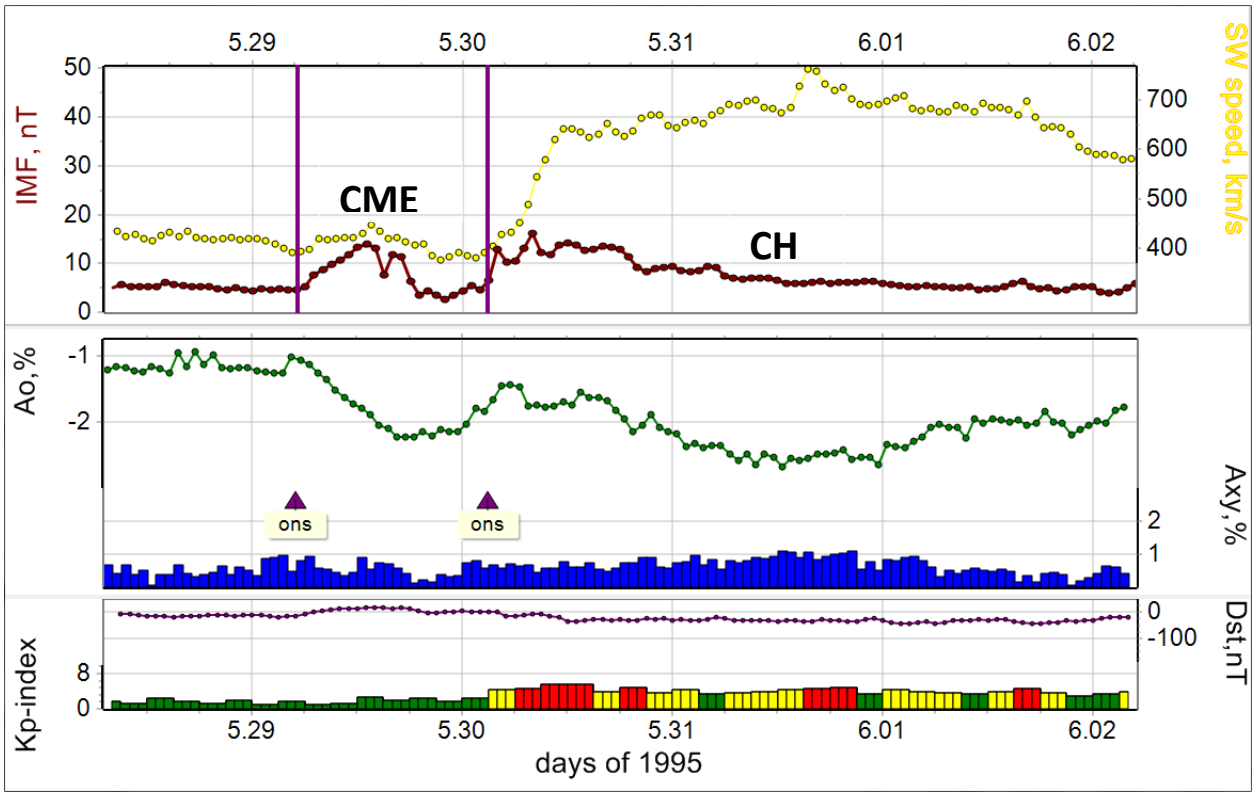


Рис. Поведение основных параметров солнечного ветра, космических лучей и геомагнитной активности при взаимодействии коронального выброса массы (CME) и потока из корональной дыры (CH) в мае-июне 1995 г.

Белов А.В., Абунин А.А., Абунина М.А. поддержаны грантом РНФ № 20-72-10023.

ON THE RATIO OF DRIFT AND DIFFUSION IN THE MODELS OF GCR PROPAGATION IN THE HELIOSPHERE

M. B. Krainev[1], M.S. Kalinin[1], O.P.M. Aslam[2], M.D. Ngobeni[2,3], M.S. Potgieter[4]

[1]*Lebedev Physical Institute, RAS, 119991, Moscow, Russia*

[2]*Center for Space Research, NWU, Potchefstroom, South Africa*

[3]*School of Physical and Chemical Sciences, NWU, Mmabatho, South Africa*

[4]*Retired*

**E-mail: mkrainev46@mail.ru*

Presently, due to the large dimensions and incomplete experimental study of the heliosphere, the main coefficients of the transport equation (TPE) for the propagation of galactic cosmic rays (GCR; models of the solar wind and heliospheric magnetic field (HMF) etc.) are still mostly postulated. It is known that some of the detailed features of GCR observations can be described using different sets of TPE coefficients. For example, the proton spectrum observed at the Earth during sunspot minimum for a given HMF polarity A can be described with particle drifts considered and with both relatively high and low diffusion coefficients used. We call these two cases high- and low-diffusion approximations. However, if one repeats calculations with the same diffusion coefficients but with an opposite A, the results, respectively, weakly or strongly deviate from the previous spectrum due the opposite directions of particle drift. So these two variants of choosing diffusion coefficients can cause weak- and strong-drift effects based on approximations made for all relevant modulation parameters.

If we consider detailed aspects of the observed GCR distribution in the heliosphere (for example, the latitudinal intensity gradient etc.) it turns out that the whole set of observations is better described by high-diffusion (and hence weak drift effects) approximation. However, we hope that investigation in the low-diffusion (and hence strong drift effects) approach, in conjunction with other methods, can assist in understanding of how GCR drift contributes to GCR modulation. In the talk we illustrate with numerical calculations and discuss these questions.

МОДУЛЯЦИЯ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 2D и 3D МОДЕЛЯХ ГЕЛИОСФЕРЫ.

Калинин[1] М.С., Базилевская[1] Г.А., Крайнев[1] М.Б., Свиржевская[1] А.К., Свиржевский[1] Н.С., Аслам[2] О.П.М., Нгобени[2] Д., Потгитер[3] М.С.

1- Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва, Россия, e-mail: kalininms@lebedev.ru
2- Центр космических исследований Северо-Западного университета, Потчефструм, Южная Африка,
3- уволился из Центра космических исследований Северо-Западного университета, Потчефструм, Южная Африка.

В работе проведены расчёты интенсивности галактических протонов в последовательных минимумах солнечной активности 23/24 и 24/25 циклов, отличающихся знаком общего магнитного поля Солнца. Расчёт проводился в рамках решения уравнения модуляции в 2D и 3D вариантах при одинаковой модели гелиосферы. Единственным меняющимся параметром для последовательных минимумов солнечных циклов была полярность $A=\pm 1$ гелиосферного магнитного поля. Сравнение результатов описания интенсивности показало, что описание в рамках 2D уравнения, являющегося результатом предварительного усреднения по долготе полного 3D уравнения, практически совпадают с усреднёнными по долготе решениями полного 3D уравнения. Этот результат является следствием взаимной компенсации долготных вариаций интенсивности в секторной зоне гелиосферы в 3D уравнении, обусловленных дрейфовым механизма модуляции, зависящим от знака гелиосферного магнитного поля. Результаты расчётов по обоим расчётным вариантам сопоставлялись с данными стратосферных измерений интегральной интенсивности протонов с энергией T > 100 МэВ, проводимых в ФИАН.

ПОИСК АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЦА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ В КАРТАХ РАССЕЯННОГО СОЛНЕЧНОГО ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЯ

Авдеева А.С.[1,2], **Измоденов В.В.**[1,2,3], **Катушкина О.А**[2]

[1] *НИУ ВШЭ, avolosatykh@hse.re*
[2] *ИКИ РАН*
[3] *МГУ им. М.В.Ломоносова*

Научный руководитель: Измоденов В.В., д-р физ.-мат.наук
ИКИ РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова, НИУ ВШЭ

Солнечные Лайман-альфа фотоны рассеиваются на нейтральных атомах водорода, которые проникают в гелиосферу из межзвездного пространства. Было показано (Bertaux et al., 2000), что данные о рассеянном Лайман-альфа излучении могут быть использованы для обнаружения активных областей на обратной (невидимой с Земли в данный момент) стороне Солнца. Так как активные области Солнца излучают больше фотонов, чем спокойные, они освещают больше атомов и вносят дополнительный вклад в регистрируемое излучение. Это дополнительное излучение можно обнаружить на полных картах рассеянного Лайман-альфа излучения даже в том случае, если активность находится на обратной стороне Солнца.

В данной работе реализуется модель рассматриваемого явления, а также предлагается метод решения обратной задачи – определения параметров активной области по данным измерений Лайман-альфа излучения на космическом аппарате SOHO (прибор SWAN) и модельному распределению межзвездного водорода в гелиосфере. Этот метод позволяет определить местоположение активной области (долготу и широту), а также комбинацию ее размера и интенсивности. Метод апробирован на модельных картах и показывает хорошее соответствие. С использованием модели проведен анализ данных SOHO (SWAN) в июле 2016 года и получены оценки параметров активной области на определенные моменты времени. Полученные нашим методом параметры активной области (долгота и широта) сравниваются с положением видимых на изображениях Солнца, полученных космическим аппаратом STEREO.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ГЕЛИОСФЕРЕ. ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ.

Годенко Е.А.[1,2,3], **Измоденов В.В.**[1,2,3]

[1]*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, eg24@yandex.ru*

[2]*Институт проблем механики имени А.Ю.Ишлинского РАН, г. Москва, Россия*

[3]*Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия*

Гелиосфера движется относительно локальной межзвездной среды, которая состоит из плазменной, нейтральной [1] и пылевой компонент. Из-за относительного движения частицы межзвездной пыли проникают в гелиосферу. Динамику движения пылевых частиц в гелиосфере, главным образом, определяют три силы: сила Лоренца, сила гравитационного притяжения и сила радиационного отталкивания. В наших предыдущих работах мы показали наличие сингулярностей [2] и областей повышенной концентрации в распределении пыли для случая плоского стационарного гелиосферного токового слоя, находящегося в фазе фокусировки, а также исследовали влияние дисперсии скоростей пыли [3] на упомянутые особенности. В реальности, гелиосферный токовый слой плоским и стационарным не является вследствие вращения Солнца вокруг своей оси, а также эффектов, связанных с циклами солнечной активности. Цель данной работы - исследование влияния нестационарности гелиосферного токового слоя на формирование особенностей в распределении концентрации.

Для описания движения межзвездной пыли используется кинетический подход, который состоит в решении кинетического уравнения для функции распределения по скоростям. Движение гелиосферного токового слоя складывается из двух вращений - “быстрого” вращения с периодом в 25 суток вокруг оси солнечного вращения и “медленного” вращения с периодом в 22 года (из-за циклов солнечной активности) вокруг одной из осей, лежащей в плоскости эклиптики. Решение кинетического уравнения проводится методом Монте-Карло. При добавлении указанного движения токового слоя распределение концентрации межзвездной пыли существенно меняется. В случае холодного газа все сингулярности в распределении концентрации смещаются вниз по направлению движения набегающего потока межзвездной среды (направление downwind). Моделирование для частиц различных размеров, удовлетворяющих распределению частиц по размерам в межзвездной среде, показывает, что в некоторые моменты времени области повышенной концентрации образуются и в направлении upwind, что может быть интересно в контексте астрономических наблюдений и планирования будущих миссий по исследованию межзвездной пыли.

[1] Izmodenov, V.V., Alexashov, D.B., 2015, Astrophys. J. Suppl., V. **220**, 32
[2] Mishchenko, A.V., Godenko, E.A., Izmodenov, V.V., 2020, MNRAS, V. **491**, 2808
[3] Годенко, Е.А., Измоденов, В.В., 2021, Письма в астрономический журнал, том **47**, 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА ПАРАЛЛАКСА ПОТОКОВ ГЕЛИОСФЕРНЫХ ЭНЕРГИЧНЫХ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

Балюкин И.И., Измоденов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, igor.baliukin@gmail.com

Энергичные нейтральные атомы (ЭНА) образуются в процессе перезарядки протонов солнечного ветра с атомами во внутреннем ударном слое (области возмущённого солнечного ветра между внутренней ударной волной и гелиопаузой), где плазма сильно нагрета. Потоки ЭНА водорода несут определяющую информацию о свойствах границы гелиосферы. Нами была разработана численная модель распределения энергичных нейтральных атомов водорода гелиосферного происхождения (Baliukin et al., 2020), которая качественно (и во многом количественно) воспроизводит структуру потоков ЭНА, наблюдаемую в данных космического аппарата *Interstellar Boundary Explorer* (*IBEX*), который с 2008 г. проводит измерения на орбите Земли при помощи инструмента *IBEX-Hi* (в диапазоне энергий от 0.3 до 6 кэВ). Новизна и оригинальность разработанной модели состоит в детальном кинетическом подходе для моделирования распределения над-термальной компоненты – захваченных протонов, которые рождаются в области сверхзвукового солнечного ветра и захватываются гелиосферным магнитным полем.

В рамках разработанной модели были рассмотрены различные траектории космических миссий (с использованием одного и двух космических аппаратов), а также изучены границы применимости эффекта параллакса для определения расстояния до источников рождения ЭНА из внутреннего ударного слоя. В частности, была рассмотрена концепция космической миссии с двумя аппаратами, запущенными в плоскости эклиптики в противоположных направлениях перпендикулярно направлению движения Солнца относительно локальной межзвездной среды. Были выполнены расчеты синтетических карт неба в потоках ЭНА, которые симулируют наблюдения космических аппаратов, находящихся на различных расстояниях в заданных направлениях. Результаты данных расчетов будут полезны для планирования будущих космических миссий, таких как широко обсуждаемые сейчас миссий *Interstellar Probe* (*NASA*) и *Interstellar Express* (*CNSA*, Китай).

Использование эффекта параллакса на основе синтетических модельных карт неба в потоках ЭНА позволило сделать заключение, что источники гелиосферных ЭНА водорода в направлении набегающего потока межзвёздной среды находятся на расстоянии порядка ~87-94 а.е. от Солнца. Данный результат хорошо согласуется с модельным значением расстояния ~91 а.е., полученным в случае, когда в качестве модельной меры расстояния до источника для заданного луча зрения используется взвешенное величиной интенсивности рождения ЭНА арифметическое среднее.

РАЗВИТИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО КАСКАДА ЗА ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ ПРИ СПОКОЙНЫХ УСЛОВИЯХ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Рахманова Л.С., Рязанцева М.О., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rakhlud@gmail.com

Исследование динамики характеристик турбулентности плазмы за околоземной ударной волной проводилось в последние годы на основе многочисленных) данных таких миссий, как Themis, Cluster, MMS, а также российского спутника Спектр-Р. Результаты статистических исследований свидетельствуют об эволюции турбулентного каскада при пересечении плазмой солнечного ветра околоземной ударной волны и движении вглубь магнитослоя. С другой стороны, анализ характеристик турбулентности при отдельных пересечениях магнитослоя указывает на различия в динамике турбулентного каскада в отдельно взятых событиях. При этом факторы, определяющие различия в развитии турбулентного каскада при распространении плазмы за околоземной ударной волной, до сих пор не исследовались в достаточной мере.

В данной работе развитие турбулентного каскада анализировалось для нескольких событий на основе одновременного определения характеристик турбулентности в двух и более разнесенных точках внутри магнитослоя. Проводилось сравнение параметров частотных спектров флуктуаций потока ионов и/или модуля магнитного поля в диапазоне частот 0.01-10 Гц, который соответствует переходу от инерционной области турбулентного каскада к диссипативной. Было выполнено сравнение форм и наклонов спектров между собой, а также сопоставление с предсказаниями теорий, рассматривающих развитую турбулентность. Анализ проводился для спокойных условий в набегающем потоке солнечного ветра, что наблюдается большую часть времени и, следовательно, представляет особый интерес для исследования влияния солнечного ветра на процессы в магнитосфере. Динамика характеристик турбулентного каскада рассматривалась для различной локальной топологии околоземной ударной волны. Показано различие в динамике турбулентного каскада в зависимости от удаленности точки входа локального объема плазмы к подсолнечной точке ударной волны, а также для квази параллельной и квази перпендикулярной ударной волны.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-02-00177 а.

МАСШТАБЫ ПЕРЕХОДА К РЕЖИМУ ДИССИПАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ТЕЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА.

Рязанцева М.О.[1], Рахманова Л.С.[1], Ермолаев Ю.И.[1], Лодкина И.Г.[1], Застенкер Г.Н.[1], Чесалин Л.С.[1], Шафранкова Я.[2], Немечек З.[2], Прех Л.[2]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, orearm@gmail.com*

[2] *Charles University in Prague, Czech Republic.*

С появлением измерений параметров межпланетной среды с высоким временным разрешением началось активное изучение характеристик турбулентности в солнечном ветре в широком диапазоне масштабов. В том числе, последнее время пристальное внимание уделяется исследованию особенностей турбулентного каскада на ионно-кинетических масштабах, ответственных за нагрев плазмы. Несмотря на изменчивость турбулентного каскада во времени, для указанных масштабов характерно изменение наклона спектра, т.е. излом, на некоторой частоте, связанный с переходом к процессу диссипации энергии. В предшествующих работах не удавалось четко выделить единый характеристический плазменный масштаб, определяющий излом на спектре флуктуаций между инерционной и диссипативной областью спектра, однако в ряде работ было выявлено соответствие излома разным характеристическим частотам для различных значений плазменного параметра бета. В наших работах ранее было выявлено, что в формировании турбулентного каскада определяющую роль играет тип крупномасштабного течения солнечного ветра, в котором он развивается. В том числе, для потока плазмы внутри магнитных облаков МС, в областях сжатия перед ними Sheath и в областях сжатия перед высокоскоростными потоками из корональных дыр CIR наблюдаются значительно более крутые спектры флуктуаций на кинетических масштабах по сравнению со спокойным солнечным ветром и смещение частоты излома в сторону высоких частот. В данной работе на основе анализа спектров флуктуаций потока ионов по измерениям прибора БМСВ на КА Спектр-Р проведено сравнение частоты излома спектра при переходе от инерционной к диссипативной области для разных крупномасштабных типов солнечного ветра с характеристическими плазменными частотами, определенными для того же момента времени. Показано, что для областей компрессии плазмы типа Sheath и CIR, где, как правило, $\beta_p \leq 1$, излом спектра флуктуаций статистически соответствует частоте, определяемой гирорадиусом протона. При этом как для медленного спокойного течения, с близкой величиной β_p, так и для возмущенных потоков, связанных с межпланетными проявлениями корональных выбросов массы, где $\beta_p << 1$, такое соответствие не было обнаружено. Также показано, что в медленном спокойном солнечном ветре излом спектра близок к частоте, определяемой инерционной длиной протона. Таким образом, по всей видимости, при переходе из медленного в быстрый солнечный ветер наблюдается смена режимов диссипации, что может играть роль в нагреве плазмы на границах разноскоростных потоков. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-02-00177а.

ДИНАМО ВО ВНЕШНЕМ ГЕЛИОШИСЕ: ПРОВЕРКА ПО ИМЕЮЩИМСЯ ДАННЫМ КА ВОЯДЖЕР 2

Беленькая Е.С.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ) г. Москва, Россия, elena.belenkaya.msu@gmail.com

Возможный механизм работы динамо во внешнем гелиошисе был предложен для объяснения увеличения магнитного поля на северной гелиопаузе с 0,2 до 0,4 нТл без изменения его направления, наблюдаемого космическим аппаратом Вояджер-1 (Беленькая, 2015). Судя по результатам этой работы, такого же эффекта следует ожидать и при пересечении южной гелиопаузы "Вояджером-2". В настоящей работе с этой точки зрения анализируются имеющиеся данные, полученные космическим аппаратом "Вояджер-2". Оказалось, что «Вояджер-2» измерил резкое увеличение магнитного поля на южной гелиопаузе от ~ 0,5 до ~ 0,65 нТл. Изменение направления магнитного поля было небольшим (в пределах 3°). Эти особенности магнитного поля аналогичны тем, которые обнаружил «Вояджер-1», и их можно интерпретировать с помощью того же механизма. Рассматриваемая задача усиления магнитного поля на гелиопаузе за счет действия динамо может быть актуальной и для усиления магнитного поля на границе астросферы (магнитосферы) быстро вращающейся намагниченной звезды (экзопланеты).

Работа выполнена при частичной поддержке МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ (грант № 75-15-2020-780).

1. Belenkaya E.S. // Solar Phys. 2015, V. **290**, 7, P. 2077. doi: 10.1007/s11207-015-0741-9.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДНОЙ ОБЛАСТИ В ГЕЛИОСФЕРЕ ОТ РАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ К НЕРАВНОВЕСНОЙ

Высикайло Ф.И.

МГОУ, г. Москва, Россия, filvys@yandex.ru

Самый легкий газ – электронный газ. Он первым покидает различные плазменные структуры и астрофизические объекты, где электроны находятся в виде свободного газа, в котором из-за максвеллизации функции распределения электронов по энергиям, постоянно формируется поток высоко энергичных электронов, покидающих такие кумулятивно-диссипативные структуры [1]. Это приводит к квази-постоянному положительному заряду не только положительного столба плазмы, страт, молний, катодных пятен, но и звезд и возможно галактик. Наличие квази-постоянного заряда у звезд и резкого уменьшения плотности числа частиц, от расстояния до их центра, приводит к более сильному нагреву электронов в дали от звезд в электрическом поле положительно заряженной звезды, и плазма здесь становится неравновесной, т.е. температура электронов устанавливается выше температуры ионов и нейтрального газа. (Это приводит к рассеиванию возможного компенсационного слоя из электронов).

Интерференция (взаимодействие) гравитационных и электрических потенциалов до сих пор, как правило, игнорируется астрофизиками при исследовании солнечного ветра (СВ) и других плазменных ветров от звезд и их скоплений – галактик. Возможно, первые соображения о том, что звезды положительно заряжены, высказал Росселанд в 1924г. [2], а первые оценки величины заряда Солнца в 300 Кл, удерживающего электроны у поверхности Солнца, сделал Эддингтон в 1926 г. [3]. Этот заряд Солнца соответствует значению нарушений электронейтральности на ничтожном уровне $1{,}8\cdot10^{-36}$ и возникновению отражающих кулоновских зеркал не только для протонов, но и для альфа-частиц [1]. О том, что при полученном заряде Солнца все протоны и альфа-частицы покидают поверхность Солнца и летят в гелиосферу Эддингтон не догадался. Замечание Эддингтона о том, что в Солнце должно быть разделение зарядов, обычно игнорируется в исследованиях Солнца и гелиосферы. Это происходит потому, что эффект полученный в результате его расчетов, как сказал Эддингтон, "абсурдно слаб" на поверхности Солнца [3]. И все астрофизики поверили, что роль заряда Солнца (и галактик) **всюду** в звездо-сферах ничтожна.

В данной работе аналитически, по модели положительно заряженной гелиосферы с глобальным током [1], исследована переходная область (в гелиосфере) от равновесной плазмы у поверхности положительно заряженного Солнца (на высотах порядка 1000 км от поверхности Солнца) к области неравновесной плазмы с максимальной температурой электронов до 1-2-х миллионов градусов на расстояниях от Солнца в 10-30 радиусов Солнца.

На расстояниях от Солнца порядка 1000 км доминирующим эффектом в поведении заряженных частиц (таких как электроны, протоны, альфа-частицы и др. положительно заряженные частицы с $Z/M \geq 0{,}107$) является заряд Солнца [1], роль которого на поверхности Солнца ничтожна или абсурдно слаба по Эддингтону, но становится существенна в области резкого падения плотности числа частиц в гелиосфере.

1. *Vysikaylo P.I.* Ryabukha N.S.// Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences, 2020, № 6(93), pp. 88-106. http://vestniken.ru/catalog/phys/thph/954.html

2. *Rosseland S.* // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1924. Vol. **84**, No. 308, pp. 720-728. http://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1924MNRAS..84..720R

3. *Eddington A.S. with a new foreword by Chandrasekhar S.* First published 1926. Reissued in the Cambridge Science Classics series 1988. pp. 407. https://freedocs.xyz/pdf-364186111

ОЦЕНКА НАПРАВЛЕНИЯ ПРИХОДА ФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ АНАЛИЗЕ ОТДЕЛЬНЫХ КВМ-СОБЫТИЙ

Громов С.В., Загайнова Ю.С., Громова Л.И.

ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия; sgromov@izmiran.ru

На первом этапе взаимодействия межпланетных корональных выбросов массы (*Interplanetary Coronal Mass Ejection - ICME*), сопровождающиеся межпланетными ударными волнами (*Interplanetary Shock Wave - ISW*), с магнитосферой Земли регистрируется скачок в магнитном поле Земли (*Sudden Commencement - SC*) разной интенсивности, который в некоторых случаях может инициировать развитие магнитной бури, представляя собой ее внезапное начало (*Storm Sudden Commencement - SSC*). На амплитуду и время нарастания SC кроме скорости межпланетной ударной волны и динамического давления солнечного ветра оказывает также влияние направление прихода фронта ISW (*Selvakumaran et al, 2017*). Внезапное начало бури (SSC) определяется по резкому увеличению H-компоненты геомагнитного поля, которое происходит на всей Земле и обозначает начало магнитной бури. Это время фиксируется в каталоге *SC* IAGA (*http://isgi.unistra.fr*). Чтобы оценить направление прихода фронта межпланетной ударной волны по времени старта SSC были отобраны два ICME с источниками формирования в Северном (21.06.2015 02:36 UT) и Южном (14.07.2017 01:25 UT) полушарии Солнца и сопровождавшихся ISW. При взаимодействии с магнитосферой Земли они вызвали *SSC* 22.06.2015 в 18:33 UT и 16.07.2017 в 05:59 UT с последовавшими за ними магнитными бурями (*http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm*). Анализировалось время старта *SSC* для событий 22.06.2015 и 16.07.2017 по данным с секундным временным разрешением, доступным в сети INTERMAGNET (около 40 обсерваторий северного и 20 обсерваторий южного полушарий). Для этих событий выполнена оценка появления SSC как функция геомагнитной широты и местного времени. Показано, что с приходом ICME к Земле старт *SSC* на различных наземных магнитных обсерваториях не является одновременным: время старта *SSC* на различных обсерваториях в обоих случаях оказалось различным, и распределение времен внезапных начал составляет десятки секунд.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01200953488, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-02-00150.

1. Selvakumaran R.,. Veenadhari B., Ebihara Y Kumar, Sandeep, Prasad D.S.V.V.D.(2017) The role of interplanetary shock orientation on SC/SI rise time and geoeffectiveness. Advances in Space Research 59 1425–1434.

КАТАЛОГ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА в 2019-2020гг

Лодкина И.Г. , Ермолаев Ю.И., Ермолаев М.Ю., Хохлачев А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yermol@iki.rssi.ru

В настоящее время в Каталоге крупномасштабных явлений солнечного ветра (СВ), расположенного на сайте ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/, содержатся данные идентификации типов СВ за период 1976 по 2019гг и за 292 дня 2020 года, подготовленные на базе часовых данных OMNI2. В каталоге идентифицированы 3 типа квазистационарных потоков СВ: гелиосферный токовый слой (HCS), высокоскоростные потоки (HSS) из корональных дыр и медленные потоки из корональных стримеров, и 5 возмущенных типов СВ: области сжатия перед быстрыми потоками HSS (CIR), межпланетные проявления выброса корональной массы (ICME), которые могут включать в себя магнитные облака (MC) и Ejecta с областями сжатия Sheath (SHEmc и SHEej соответственно), предшествующие им, а также межпланетная ударная волна (IS). В настоящее время Каталог крупномасштабных типов СВ (ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/) за интервал 1976-2019 годы содержит следующее число событий: CIR – 1369, Ejecta -1776, MC – 217, Sheath – 1012, магнитных бурь с минимумом Dst < - 50 нТл – 1087. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 19-02-00177.

Hα ПОГЛОЩЕНИЕ ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ HD189733b И HD209458b ПОД ВЛИЯНИЕМ ИЗЛУЧЕНИЯ РОДИТЕЛЬСКОЙ ЗВЕЗДЫ

Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф., Березуцкий А.Г., Ветрова Е.С., Шарипов С.С.

ИЛФ СО РАН, НГТУ, г. Новосибирск, Россия, mib383@gmail.com

Моделировалось влияние Lyα излучения родительской звезды на поглощение в линии Hα атмосфер горячих юпитеров HD189733b и HD 209458b. Перенос Lyα фотонов вычислялся методом Монте Карло. Задача решалась в приближении изотропного частично когерентного рассеяния. Атмосфера предполагалась сферически симметричной с заданными профилями температуры и объемной плотности атомов водорода. Профили объемной плотности возбужденных атомов водорода получены с использованием трехмерного газодинамического моделирования [1] при различных значениях параметра XUV, а также различных изначальных составах атмосфер для HD 209458b: изначально молекулярной или изначально атомной. Формы линий излучения звезд взяты из [3].

По результатам работы можно сделать заключение, что транзитное поглощение горячих Юпитеров в линии Hα значительно зависит от Lyα излучения звезды, но не может быть полностью им объяснено. Для планет HD189733b и HD209458b с атомарной атмосферой расчет показал, что поглощение в центре линии порядка ~0.5% с шириной ~40 км/с, что, все же, не может объяснить в полной мере наблюдаемые данные [4]: поглощение на уровне 1.5 % и шириной ~60 км/с. При этом поглощение происходит в слое ~1.5 радиусов планеты, где концентрация возбужденных на второй уровень атомов водорода больше 100 см$^{-3}$. Интенсивность XUV незначительно сказывается на поглощении, так как в слабо влияет на концентрацию атомов в поглощающем слое. Для случая HD209458b с молекулярной атмосферой поглощение оказалось менее 0.1%. Поглощение образуется в пределах полости Роша планет, где скорость истечения еще невелика. Поэтому ширина линии поглощения хорошо соответствует температурному максимуму термосферы (1-1.5)·10^4 К. Таким образом, измерения в Hα позволяют, потенциально, зарегистрировать раздувание верхней атмосферы горячих Юпитеров за счет поглощения ионизующей радиации родительских звезд. Сравнение полученных результатов с работами других авторов [5], а также с наблюдаемыми данными [4] позволяют сделать вывод, что помимо звездного Lyα излучения, значительный вклад в поглощение могут вносить внутриатмосферные процессы, приводящие к рождению Lyα фотонов, в первую очередь электронное возбуждение в области максимума температуры. Это предполагается более детально исследовать в дальнейшей работе.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 18-12-00080, проекта РФФИ 20-02-00520 и Проект Министерства науки и высшего образования №075-15-2020-780 «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных систем и характеристик экзопланет», суб-контракт «Численное моделирование аэрономии, газовых оболочек и магнитосфер горячих экзопланет, интерпретация наблюдательных данных по транзитному поглощению линий, лабораторное моделирование отдельных процессов в плазмосфере горячих экзопланет». Параллельное компьютерное моделирование было выполнено при помощи суперкомпьютерного центра Московского государственного университета, Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН, суперкомпьютерного центра Новосибирского государственного университета и Межведомственного кластера РАН.

1. Shaikhislamov I. F. et al. //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2019.
2. Odert P. et al. Modeling the Ly*α* //arXiv preprint 2019. arXiv:1903.10772.
3. Bourrier V., des Etangs A. L. //Astronomy & Astrophysics 2013. V. **557**. P. A124.
4. Cauley P. W. et al. //The Astronomical Journal 2016. V. **152**(1). P. 20.
5. Huang C. et al. //The Astrophysical Journal 2017. V. **851**(2). P. 150.

ВАРИАЦИИ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В РАЗЛИЧНЫХ ТИПАХ ТЕЧЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА.

Москалева А.В., Рязанцева М.О., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, orearm@gmail.com

Стабильность направления потока солнечного ветра является актуальной задачей для прогноза космической погоды. Ранее неоднократно было показано, что невозмущеный солнечный ветер распространяется, как правило, радиально, тогда как значительные изменения направления могут наблюдаться в областях взаимодействия потоков с различными скоростями, например в областях Sheath, предшествующих межпланетным проявлениям корональных выбросов массы или областях CIR, предшествующих высокоскоростным потокам из корональных дыр [1, 2]. В данной работе анализируются статистические распределения величин долготного (φ) и широтного (θ) углов направления потока солнечного ветра, а также их вариаций на масштабах от нескольких десятков секунд до часа с использованием измерений на космическом корабле WIND. Также проводится сравнение анализируемых распределений в спокойном солнечном ветре и в различных крупномасштабных типах течения, с помощью каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра на ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog [Ермолаев и др., 2009]. Выявлено, что для компрессионных типов течения SHEATH и CIR наблюдаются максимальные значения модуля долготного (φ) и широтного (θ) углов, а также их вариаций, при этом вероятность наблюдения больших (>5˚) отклонений от радиального направления также значительно возрастает. При этом показано, что при уменьшении масштаба флуктуаций зависимость от типа ветра ослабевает. Также рассмотрены зависимости величины и флуктуаций углов направления от значений параметров плазмы в солнечном ветре. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-02-00177а.

1. Yermolaev Y. I., Lodkina I. G., Nikolaeva N. S., Yermolaev M. Y. 2017, Solar Physics, 292 (12),193, https://doi.org/10.1007/s11207-017-1205-1
2. Yermolaev, Yu. I., Nikolaeva N. S., Lodkina, I. G. Yermolaev, M. Yu., 2009, Cosmic Res. 47 (2), 81–94, https://doi.org/10.1134/S0010952509020014

11-ЛЕТНИЙ ИНДЕКС ЛИНЕЙНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ПЛАНЕТ ВЕНЕРА, ЗЕМЛЯ, ЮПИТЕР И СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ

В. П. Охлопков
ovpetrovich@yandex.ru

В данной работе используется эволюция введенного автором параметра, характеризующего взаимное положение планет – средней за день разности гелиоцентрических долгот для пары планет. Рассмотрены попарно планеты Венера, Земля и Юпитер. По минимальным отклонениям планет от линии, проходящей через них и Солнце при расположении планет по одну сторону от Солнца (планеты находятся в соединении), а также при расположении планет по разные стороны от Солнца и на одной линии с ним, разработан индекс (*JEV*), описывающий 11-летний цикл солнечной активности. Эти три планеты в своем движении вокруг Солнца создают линейные конфигурации с Солнцем. И эти планеты - Венера, Земля и Юпитер- в своих линейных конфигурациях имеют 11-летний цикл. Кроме того, проведены расчеты средних разностей для четырех планет с участием планеты Меркурий. Показано, что Меркурий не вписывается в 11-летние линейные конфигурации планет Венера, Земля и Юпитер и не участвует в максимальном гравитационном воздействии на Солнце. Только планеты Венера, Земля и Юпитер в своих линейных конфигурациях имеют 11-летний цикл. Проведено сопоставление индекса *JEV* с солнечной активностью и показано, что средние 11-летние периодичности в индексе *JEV* и в солнечной активности за1000-летний интервал времени совпадают с точностью до второго знака после запятой (11.07 лет). Это указывает на возможную связь индекса *JEV* с 11-летним циклом солнечной активности. Планеты влияют на солнечную активеность.

1. Okhlopkov V.P., 11-Year Index of Linear Configurations of Venus, Earth, and Jupiter and Solar Activity, в журнале *Geomagnetism and Aeronomy*, издательство *Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation)*, том 60, № 3, с. 381-390

2. Охлопков В.П., 11-летний индекс линейных конфигураций планет Венера, Земля, Юпитер и солнечная активность, в журнале *Геомагнетизм и аэрономия*, издательство *Наука (М.)*, том 60, № 3, с. 393-403
DOI: 10.31857/S0016794020030141

АНАЛИЗ ДАННЫХ ДЕТЕКТОРА СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Пальмин В. С.[1, 2], **Стадничук Е. М.**[1, 3, 4], **Хамитов Т. М.**[1, 2]

[1] *МФТИ (НИУ), г. Долгопрудный, Россия*

[2] *ИЯИ РАН, г. Москва, Россия*

[3] *НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия*

[4] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

E-Mail palminv@me.com

В этой работе мы представляем лабораторный прототип детектора частиц солнечной энергии (SEP), который будет работать вместе с другими космическими приборами, чтобы дать нам больше информации о физике SEP. Прибор предназначен для регистрации протонов и электронов с кинетической энергией от 10 до 100 МэВ и от 1 до 10 МэВ соответственно. Детектор основан на сцинтилляционном цилиндре, разделенном на отдельные диски, чтобы получить больше информации об обнаруженных частицах. Сцинтилляционный свет от изолированных сегментов собирается оптическими волокнами и регистрируется с помощью кремниевых фотоумножителей (SiPM). Каналы детекторов были откалиброваны, в случае протонов есть пик Брэгга, поэтому можно производить калибровку по тем же частицам, которые детектируем. Для каждого канала было получено энергетическое разрешение.

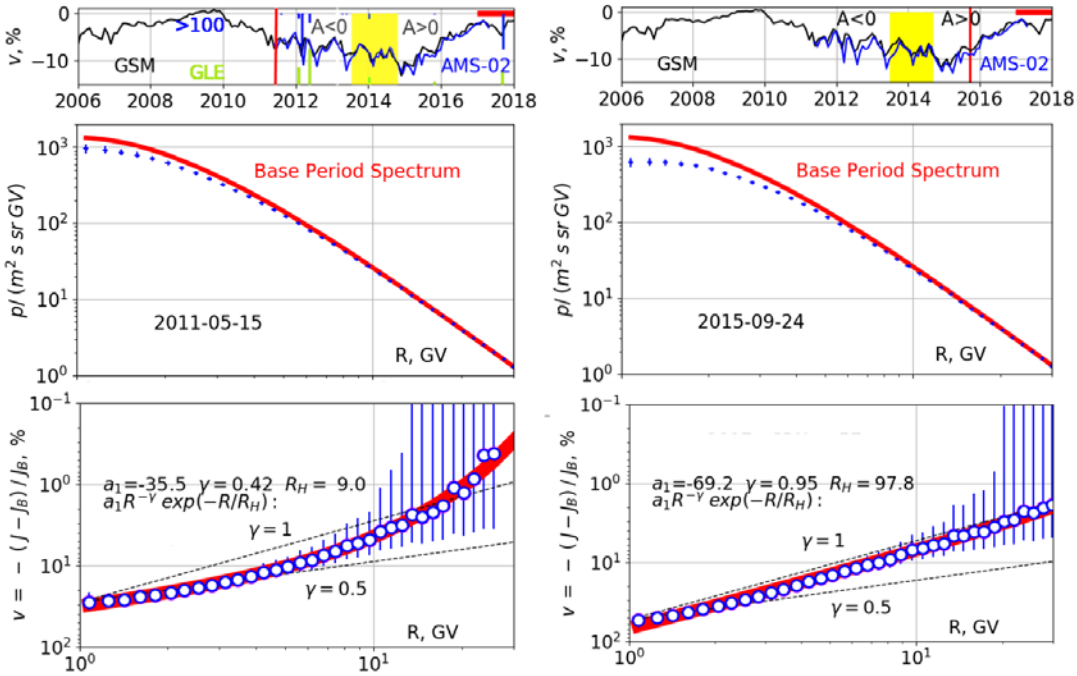
Полный анализ формы сигнала требует довольно быстрой электроники и большой вычислительной мощности, что не всегда доступно на космическом корабле. Поэтому мы рассмотрели другую процедуру анализа. Идея метода состоит в том, чтобы зарегистрировать время, в течение которого сигнал превышает заданный порог, а затем восстановить его амплитуду на основе ширины сигнала, а не его высоты или интеграла. Электроника в настоящее время находится в стадии разработки, но в этой работе мы приводим лишь некоторые соображения, основанные на данных от мюонов, рожденных в атмосфере, и протонов, полученных на ускорителе. В обоих случаях данный подход позволил достаточно хорошо восстановить распределение сигнала, то есть получить полную информацию. Ограничением является то, что функцию, по которой восстанавливался интеграл сигнал, нельзя экстраполировать на большие энергии, требуется свой анализ. Таким образом, откалиброванный детектор с новой электроникой сможет восстанавливать спектр сигналов для частиц выбранных энергий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СПЕКТР ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ЖЕСТКОСТЕЙ ПО ДАННЫМ AMS-02

Янке В.Г., **Белов А.В., Шлык Н.С., Кобелев П.Г., Трефилова Л.А.**

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва yanke@izmiran.ru

В работе для галактических космических лучей в диапазоне жесткостей 1-50 GV, к которым чувствительны нейтронные мониторы и мюонные телескопы, экспериментально найден трехпараметрический спектр вариаций космических лучей по данным магнитных спектрометров AMS-02 и баллонного стратосферного зондирования. Найдено, что в период отрицательной полярности магнитного поля Солнца наблюдается степенной спектр вариаций с сильным экспоненциальным затуханием в области больших жесткостей. При смене полярности в начале нового 24-го солнечного цикла на положительную полярность спектр вариаций космических лучей переходит в чисто степенной спектр. Отход от эмпирически задаваемого к экспериментально найденному спектру вариаций позволит снять ряд неопределенностей и повысить точность анализа наземной сети детекторов.



Пример результата анализа для периода отрицательной (слева) и положительной (справа) полярности межпланетного магнитного поля. На средних панелях показаны спектры частиц в текущий и базовый момент времени. Найденные на их основе спектры вариаций показаны на нижних панелях.

ВЫВОДЫ

1) По данным AMS-02 спектр вариаций космических лучей в диапазоне жесткостей 1-20 GV хорошо описывается степенным спектром, модулированным экспонентой в области верхних жесткостей

$$v = a_1 R^{-\gamma} \exp(-R/R_H)$$

2) В период отрицательной полярности A<0 магнитного поля Солнца наблюдается степенной спектр вариаций с сильным экспоненциальным затуханием. При смене полярности A>0 и начала нового 24-го солнечного цикла спектр вариаций космических лучей переходит в чисто степенной спектр.

КОНФИГУРАЦИЯ МАГНИТОСФЕРНОГО ТОКОГОВ СЛОЯ

Артемьев А.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия; UCLA, Los Angeles, USA ante0226@yandex.ru

Пространственный масштаб и интенсивность магнитосферного токового слоя определяют конфигурацию и динамику всей хвостовой области магнитосферы и, как следствие, контролируют инициализацию и протекания таких энергетически-важных процессов, как магнитосферные суббури. В этом докладе представлены статистические данные по балансу плазменного давления и натяжений силовых линий магнитного поля вдоль магнитосферного слоя. Основываясь на измерениях плазменных токов и магнитных полей спутниками миссии MMC и учитывая вклад энергичной компоненты ионов в давление плазмы, удаётся показать, что в наиболее интенсивных (и наиболее тонких) токовых слоях баланс натяжения силовых линий требует наличия анизотропного или негиротропного плазменного давления. Иными словами, наблюдаемые токовые слои слишком вытянуты вдоль магнитосферного хвоста, чтобы градиент давления плазмы мог уравновесить силу натяжения силовых линий. При этом такие вытянутые интенсивные слои наблюдаются в отсутствии плазменных потоков и составляют существенную часть наблюдений (до 10%).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ТОКОВЫХ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ И МАГНИТОСФЕРНОЙ СУББУРИ

Зимовец И.В., Артемьев А.В., Шарыкин И.Н., Nishimura Y.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivanzim@iki.rssi.ru

Плазменные процессы, лежащие в основе таких энергетически-мощных явлений как солнечные вспышки и магнитосферные суббури во многом сходны, но существенная разница в плазменных характеристиках этих систем, а также различия экспериментальных данных препятствуют их сравнению более чем на схематичном уровне. В представляемой работе предпринята попытка перейти от такого схематичного сравнения к качественному уровню для отдельного типа процессов, играющих значительную роль в развитии вспышек и суббурь. Речь идёт о формировании системы токов, соединяющих область энерговыделения (в короне для вспышек и в хвосте магнитосферы для суббурь), заполненную горячей разреженной плазмой, и область, заполненную холодной столкновительной плазмой (хромосфера/фотосфера и ионосфера, соответственно). На примере анализа двух событий - одной вспышки и одной суббури - проведено качественное сравнение развития и разрушения токовых систем в привязке к формированию популяций ускоренных частиц и их высыпанию в хромосферу/фотосферу или ионосферу. Показано, что обоим системам присущи сходные основные временные последовательности и характерная эволюция токов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-72-20134).

НАБЛЮДЕНИЕ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ МАГНИТОПЛАЗМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ВО ВРЕМЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОЙ ДИПОЛИЗАЦИИ В БЛИЖНЕМ ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ СПУТНИКАМИ MMS.

Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, anmaurdreg@gmail.com

Исследование мелкомасштабных структур и процессов в магнитосфере Земли до недавнего времени были ограничены отсутствием космических миссий с достаточно высоким временным разрешением измерений, тем более не существовало многоспутниковых миссий с малым пространственным разнесением. Первые исследования таких масштабов стали доступны сравнительно недавно, когда пара спутников миссии Cluster в 2013-2014 году находились на расстоянии порядка электронных масштабов. Дальнейшее развитие таких исследований стало доступно с запуском космической миссии MMS в 2016г. В данной работе представлены наблюдения 06.07.2017 01.37–01.55 UT MMS в хвосте магнитосферы Земли на расстоянии $X \sim -18.3R_E$ (R_E — радиус Земли) и результаты анализа двух последовательных продолжительных диполизаций . В данных диполизациях было выделено по 4 диполизационных фронта (ДФ), имеющих скорости распространения от 130 км/с до 360 км/с и характерные масштабы от ~ 1 до ~ 5 ионных гирорадиусов. Новые многоспутниковые наблюдения позволили как провести наблюдения мелкомасштабной токовой структуры, так и оценить её масштаб ($\lesssim 0.4$ ионного гирорадиуса) и интенсивность плотностей токов (от 10 до 60 нА/м^2) связанных с этой структурой. Также показано, что мелкомасштабная токовая структура имеет сложную трёхмерную конфигурацию.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-32-90009.

КАППА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Антонова Е.Е.[1,2], Степанова М.В.[3], Овчинников И.Л.[1], Кирпичев И.П.[2], Сотников Н.А.[1], Воробьев В.Г.[4], Ягодкина О.И.[4], Пулинец М.С.[1], Мить С.К.[1]

[1]*НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова*

[2]*Институт Космических Исследований РАН*

[3]*University of Santiago de Chile*

[4]*Полярный Геофизический институт*

Проведенный анализ аппроксимаций в магнитоспокойных условиях функций распределения ионов и электронов в магнитосфере Земли каппа-распределениями. Каппа-распределения описывают характерные для условий в бесстолкновительной магнитосферной плазме функции распределения с максвелловским ядром и степенным хвостом. Выделены условия и области, в которых *k*-параметр каппа аппроксимаций достигает максимальных значений, что соответствует действию интенсивных процессов термализации, т.е. приближения функции распределения к распределению Максвелла. Формирование степенных хвостов у функций распределения и процессов термализации является следствием существования высокого уровня турбулентных флуктуаций в магнитосфере. Суммированы результаты изучения магнитосферной турбулентности в широком диапазоне масштабов и временных интервалов, связи турбулентности в магнитосфере с турбулентностью солнечного ветра и магнитослоя. Показано, что крупномасштабная магнитосферная конвекция может рассматриваться в качестве интегрального масштаба магнитосферной турбулентности. Обсуждена применимость МГД подхода к описанию магнитосферной турбулентности и генерации возмущений, описываемых в рамках магнитного пересоединения.

Зависимость показателя политропы плазмы от каппа-параметра в условиях магнитосферы Земли.

Кирпичев И.П. [1], **Антонова Е.Е.** [2, 1]

[1] *ФГБУ науки Институт космических исследований РАН, г. Москва, ikir@iki.rssi.ru*
[2] *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова, г. Москва*

Магнитосфера Земли представляет собой гигантскую лабораторию для изучения процессов в бесстолкновительной плазмы. Теоретический анализ и результаты экспериментальных наблюдений показывают, что бесстолкновительная плазма с нелокальными дальними взаимодействиями с течением времени релаксирует к каппа подобным функциям распределения, с последующей максвеллизацией. Процессы релаксации в настоящее время сравнительно мало исследованы, но не вызывает сомнение их зависимость от макроскопических параметров плазмы.

Проведен анализ характеристик локальной энтропии плазмы в условиях магнитосферы Земли вблизи экваториальной плоскости с использованием данных наблюдений миссии THEMIS за 4 года (2007-2010 гг.). Выделены спектры ионов на геоцентрических расстояниях от 3 до 20 R_E вблизи экваториальной плоскости, позволяющие проводить аппроксимацию спектров одним каппа распределением. Определены параметры таких аппроксимаций. Предполагалось, что изменение энтропии описывается законом политропы в областях с определенным плазменным параметром. Определено усредненное значение показателя политропы в зависимости от величины к-параметра каппа аппроксимаций, характеризующего жесткость высокоэнергичного хвоста функции распределения при дифференциации плазмы по значению плазменного параметра β.

СОПРЯЖЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АВРОРАЛЬНЫХ ОМЕГА СТРУКТУР В МАГНИТОСФЕРЕ

Апатенков С.В., Андреева В.А., Гордеев Е.И.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, apatenkov@mail.ru

Для авроральных омега структур, регистрируемых сетью наземных камер всего неба проекта THEMIS, были отобраны сопряженные спутниковые наблюдения миссий THEMIS и MMS. В работе мы сравниваем портрет магнитосферного источника авроральных омега структур, полученный в глобальных МГД симуляциях, со спутниковыми наблюдениями. В частности, удается выделить плазменные структуры с существенно отличающейся концентрацией и температурой, которые могут являться следующей стадией эволюции нестационарных струйных течений (BBF).

Работа проведена в рамках проекта РНФ 19-77-10016.

МНОГОЧАСОВАЯ ДИНАМИКА ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ И ИОНОСФЕРЫ ПОСЛЕ ПОВОРОТА ММП К ЮГУ

Панов Е.В.[1], Сергеев В.А.[2], Кубышкина М.В.[2], Малыхин, А. Ю.[3], Григоренко Е.Е.[3]

[1]*KFU, Graz, Austria, evgeny.panov@oeaw.ac.at*

[1]*НИИФ им. В.А. Фока, СПбГУ, Санкт-Петербург*

[3]*ИКИ РАН, Москва*

Пользуясь ионосферными и наземными наблюдениями во время многочасового пролёта MMS в хвосте магнитосферы после поворота межпланетного магнитного поля к югу, мы отслеживаем изменения в конфигурации и динамике плазменного слоя совместно с реакцией на эти изменения в ионосфере. Между 18 и 5UT MMS покрыл растояние от 8 до 19 R_E (R_E – радиус Земли) двигаясь из внутренней магнитосферы радиально от Земли в плазменном слое. Ввиду слабой активности (SML ~ -100 nT), событие может быть отнесено к периоду стационарной конвекции, подпитываемое с ночной стороны. На ночной стороне, во время своего пролёта MMS наблюдал серию небольших активизаций (BBF), включавшую в себя четко выраженную последовательность диполизаций. Ионосферный отклик активизаций и данной последовательности был виден в обоих полушариях на меридиане Гренландии. Пользуясь адаптивной моделью, а так же исследуя данные энергичных электронов с POES/NOAA, мы обсуждаем связь между глобальной конфигурацией ближнего (X_{GSM} > -20 R_E) хвоста магнитосферы, наблюдаемыми активациями на MMS и откликом на них в сопряженной высокоширотной части аврорального овала.

ПАРАМЕТРЫ МАГНИТОСФЕРЫ ЮПИТЕРА, ВОССТАНОВЛЕННЫЕ ПО МАГНИТОГРАММАМ *JUNO.*

Алексеев И. И., Беленькая Е.С., Лаврухин А.С., Лукашенко А.Т., Пенсионеров И.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, 119992, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2. Россия, iialexeev@mail.ru

Экваториальный токовый диск Юпитера, формирующийся при радиальном разлёте магнитосферной плазмы, является главной магнитосферной токовой системой. Токовый диск Юпитера наряду с потоком солнечного ветра и межпланетным магнитным полем определяет структуру и размеры гигантской магнитосферы Юпитера. Во время полёта КА *Juno* по орбите искусственного спутника Юпитера за прошедшие 4,5 года с момента перехода КА на эту орбиту в июле 2016 года, он совершил 30 оборотов вокруг планеты по сильно-вытянутой эллиптической приполярной орбите. При этом данные с перийовных участков траектории, когда аппарат сближался с планетой, позволили уточнить параметры диполя, а магнитное поле диска удалось определить по измерениям поля в средней магнитосфере, где из-за наклона диполя к оси вращения КА пересекал плоскость диска дважды за каждый оборот Юпитера вокруг своей оси. В работе [1] была построена модель формы диска и профиля тока в нём, которая дала лучшее к настоящему моменту совпадение модельного поля с данными измерений вектора магнитного поля вдоль траектории *Juno*. Оптимальные параметры модели были получены в [2] для 19-ти оборотов *Juno*. Кроме того, используя ту же методику, были рассчитаны параметры диска Юпитера для эпохи *Galileo*, для всех 35-ти оборотов КА.

Мы предлагаем схему, которая позволяет, основываясь на отъюстированных по данным магнитометров параметрах диска в модели [2], определить величину магнитного поля диска в центре Юпитера, дипольный магнитный момент диска и магнитный поток, который диск перенаправляет из сердцевины магнитосферы в хвост в ночной стороне, для каждого оборота КА. Эти параметры позволяют оценить полную энергию плазмы диска и величину поля в подсолнечной точке магнитопаузы. Мы проанализировали, какие выводы о размере области открытых линий на уровне ионосферы и о положении главного овала полярных сияний Юпитера можно сделать на основании полученных результатов. В докладе обсуждается временная динамика магнитосферы и её изменчивость от оборота к обороту.

Авторы выражают благодарность правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-202-780 (N13.1902.21.0039). Данные КА *Juno* и *Galileo* были получены с помощью Planetary Data System (PDS; https://pds-ppi.igpp.ucla.edu).

1. Пенсионеров И.А., Беленькая Е.С., Алексеев И.И., Модель токового диска Юпитера с параметрами, оптимизированными по измерениям магнитного поля во время миссий *Juno* и *Galileo* // Космические исследования, том 59, № 2, 2021.
2. Pensionerov I.A., et al. Model of Jupiter's current sheet with a piecewise current density // J. Geophysical Research: Space Physics. 2019. V. 124. № 3. P. 1843–1854.

ACCELERATION OF IONS IN JOVIAN PLASMOIDS: DO MAGNETIC FLUCTUATIONS PLAY A ROLE?

Kronberg E. A.[1], Grigorenko E. E.[2], Malykhin A.[2], Kozak L.[3], Petrenko B.[3], Vogt M. F.[4], Roussos E.[5], Kollmann P.[6], Jackman C. M.[7], Kasahara S.[8], Malova Kh. V.[9], Tao C.[10], Radioti A.[11], Masters, A[12].

[1]*Ludwig Maximilian University of Munich, Germany* kronberg@geophysik.uni-muenchen.de

[2]*Space Research Institute, Russia;*

[3]*Kyev Taras Shevchenko University, Ukraine;*

[4]*Boston University, USA;*

[5]*Max Planck Institute for Solar System Research, Germany;*

[6]*Johns Hopkins University, USA;*

[7]*University of Southampton, UK;*

[8]*University of Tokyo, Japan;*

[9]*Lomonosov Moscow State University, Russia;*

[10]*Tohoku University, Japan;*

[11]*Université de Liège, Belgium;*

[12]*Imperial College London, UK*

A rapidly rotating Jovian magnetodisk dominated by oxygen and sulfur needs an additional energy input to account for the observed energy density. There are many acceleration mechanisms for ion energization in the magnetotail. We investigate the effectiveness of ion acceleration to supra-thermal energies for multiple species and for different levels of electromagnetic fluctuations in plasmoids of the Jovian magnetotail and compare it the situation at Earth. We use ion observations and magnetic field measurements by the Galileo spacecraft. Our model predicts that electromagnetic fluctuations in plasmoids play an essential role in the acceleration of heavy and hydrogen ions, as in terrestrial case. The observations show a decrease of the oxygen and sulfur energy spectral index gamma at ~30 to ~400 keV/nuc with the electromagnetic wave power indicating an energy transfer from the waves to particles, in agreement with the model. The wave power threshold for efficient acceleration is 10s of nT2/Hz, as in terrestrial plasmoids. However, this is not observed for hydrogen ions. This indicates that processes other than wave-particle interaction are more important for the acceleration of these ions or that the time and energy resolution of the Galileo observations is too coarse. The results are expected to be confirmed by measurements by the Juno spacecraft.

1. Kronberg E. A. et al., //JGR 2019//doi:10.1029/2019JA026553

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСФЕРЫ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА И НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

Шайхисламов[1] И.Ф., Ходаченко[1,2] М.Л., Мирошниченко[1] И.Б.

1) ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ildars@ngs.ru
2) Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria

Первые наблюдательные свидетельства расширения и истечения экзопланетной атмосферы были получены в результате обнаружения транзитного поглощения для горячего Юпитера HD-209458b. С 2004 г. для него были сделаны спектральные измерения телескопом Хаббл в ВУФ диапазоне в линиях Lya, резонансных линиях CI, OII, SiIII. Совокупность данных и численное моделирование показывают, что верхняя атмосфера HD-209458b раздута в результате нагрева ионизующим излучением звезды за пределы полости Роша и испытывает гидродинамическое сверхзвуковое истечение.

Влияние планетарного магнитного поля на истечение верхней атмосферы горячих экзопланет остается актуальной проблемой. Самосогласованное моделирование планетарного ветра в присутствии собственного магнитного поля планеты в 2D геометрии было впервые реализовано авторами в работе [1]. Для HD-209458b 2D расчеты показали, что критическая величина магнитного поля, при которой потеря массы значительно уменьшается, составляет примерно 0.3-1 Гс на экваторе. Полученные результаты по структуре магнитосферы были применены для анализа другой очень важной задачи физики горячих экзопланет, которая активно рассматривается в последние годы – возможное радиоизлучение магнитных горячих юпитеров и его регистрация на Земле [2].

До настоящего времени глобальное 3D МГД моделирование в рамках которого рассматривается взаимодействие планетарного течения с замагниченным звездным ветром с учетом магнитного поля планеты развивалось на основе уже имеющихся астрофизических кодов. В нашей работе применяется код, впервые разработанный специально для моделирования горячих экзопланет. Это потребовало интегрирования магнитной газодинамики взаимодействующих сверхзвуковых потоков с многокомпонентной аэрономией и расчетом поглощения в спектральных линиях в 3D геометрии звездной системы. Мы применяем схему расчета уравнения индукции в трехмерной сферической системе координат. Это гораздо сложнее, чем обычно используемая декартова система координат, но позволяет максимально точно учесть естественную геометрию задачи, а также оптимально разбить на ячейки рассматриваемую область.

Мы рассчитали картину планетарного течения горячего юпитера HD-209458b при параметрах, которые обычно предполагают для рассматриваемой системы и брались нами ранее при расчетах 3D газодинамическим кодом без учета магнитного поля [3]. Для обнаружения наблюдательных проявлений было рассчитано при различных величинах дипольного магнитного поля планеты поглощение в линиях Lya, CI, OII, а также впервые для это планеты в линии метастабильного гелия 1083 нм.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки 075-15-2020-780, проектов РНФ-18-12-00080, РФФИ-20-02-00520.

1. Khodachenko M.L. et al. // *The Astrophysical Journal 2015*, 813:50
2. Weber C. et al. // *MNRAS 2017*, 469, p.3505-3517
3. Shaikhislamov I.F. et al. // *MNRAS 2020*, 491(3), 3435-3447

СВЯЗЬ МАГНИТОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ ЮПИТЕРА С УЧЕТОМ АСИММЕТРИИ МАГНИТОСФЕРЫ

Пенсионеров И. А., Беленькая Е. С., Алексеев И. И.

pensionerov@gmail.com

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (НИИЯФ МГУ),119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2,

Важной особенностью магнитосферы Юпитера является наличие мощного источника плазмы внутри магнитосферы — вулканически активного спутника Ио. Ио выбрасывает около 1000 кг вещества, которое впоследствии ионизируется. Вблизи планеты эта плазма вращается практически твердотельно вместе с планетой, однако с удалением от нее угловая скорость начинает постепенно снижаться. Поддержание ковращения обеспечивается передачей момента импульса от планеты к магнитосферной плазме. Ключевую роль при этом играет взаимодействие магнитосферы и ионосферы (М-И взаимодействие). Токовая система М-И взаимодействия состоит из радиальных токов в экваторе магнитосферы, педерсеновских токов на ионосфере, а также продольных токов, замыкающих их.

В работе [1] было дано количественное описание этого процесса для случая дипольного магнитного поля. В работе [2] были получены решения для модели, включающей поле токового диска Юпитера. В работах [3] и [4] была показана связь между вытекающими из ионосферы продольными токами М-И связи и главным овалом полярных сияний на Юпитере. В работе [4] было исследовано влияние на М-И связь модуляции проводимости ионосферы электронами, высыпающимися в районе главного овала полярных сияний. Было показано, что эта модуляция оказывает существенное влияние на профили продольных и радиальных токов.

Известно, что магнитосфера Юпитера существенно асимметрична. В зависимости от местного времени меняются угловая скорость плазмы, величины магнитного поля и плотности токов (см. например [6,7]). Стационарные модели М-И связи существующие на данный момент являются аксиально симметричными. Однако асимметрия магнитосферы может оказать на М-И связь существенное влияние, как из-за асимметрии величины магнитного поля, так и благодаря наличию продольных токов, вызванных асимметрией азимутальных токов, не учтенных в предыдущих стационарных моделях М-И связи.

В настоящей работе мы представляем стационарную модель М-И связи, учитывающую асимметрию магнитосферы. Для этого мы используем данные КА Juno и Galileo для определения профилей магнитного поля при разных LT, а также результаты работы [7] для учета продольных токов от азимутальных токов.

1. Hill, T. (1979), Inertial limit on corotation, J. Geophys. Res., 84(A11), 6554– 6558, doi:10.1029/JA084iA11p06554.
2. Pontius, D. H. (1997), Radial mass transport and rotational dynamics, J. Geophys. Res., 102(A4), 7137– 7150, doi:10.1029/97JA00289.
3. Hill, T.W., 2001. The jovian auroral oval. J. Geophys. Res. 106, 8101.
4. Cowley, S.W.H., Bunce, E.J., 2001. Origin of the main auroral oval in Jupiter's coupled magnetosphere–ionosphere system. Planet. Space Sci. 49, 1067.
5. Nichols, J. D., and S. W. H. Cowley (2004), Magnetosphere - ionosphere coupling currents in Jupiter's middle magnetosphere: Effect of precipitation - induced enhancement of the ionospheric Pedersen con- ductivity, Ann. Geophys., 22, 1799–1827.

РАДИАЦИОННЫЙ ФОН НА ПОВЕРХНОСТИ ЕВРОПЫ — СПУТНИКА ЮПИТЕРА

Царева О.О., Попова Е. П., Попов В. Ю., Малова Х. В., Зеленый Л. М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, olga8.92@mail.ru

В 1990-х годах миссия НАСА «Галилео» нашла убедительные доказательства существования глобального океана под ледяным покровом Европы (Kivelson et al., 2000). В таком океане не исключено наличие микроскопической жизни, так как он, возможно, не замерзает из-за воздействия приливных сил, периодические изменения которых приводят к деформации спутника и, как следствие, к нагреву его недр.

Однако орбита Европы расположена в радиационном поясе Юпитера, поэтому её поверхность подвержена сильному излучению, которое может разрушить органическую жизнь, проникающую через разломы льда на поверхность. Оценки радиации на поверхности Европы делались различными научными группами (Podzolko et al., 2011; Paranicas et al., 2000, 2009; Truscott et al., 2011; Nordheim et al., 2018), которые описывали движение электронов с помощью приближения ведущего центра. Мы уточнили и дополнили известные результаты, полученные в рамках приближения ведущего центра, с помощью прямого моделирования с учетом ларморовского радиуса частиц, наклона диполя Юпитера, альфвеновских крыльев, индуцированного и внутреннего магнитного поля Европы.

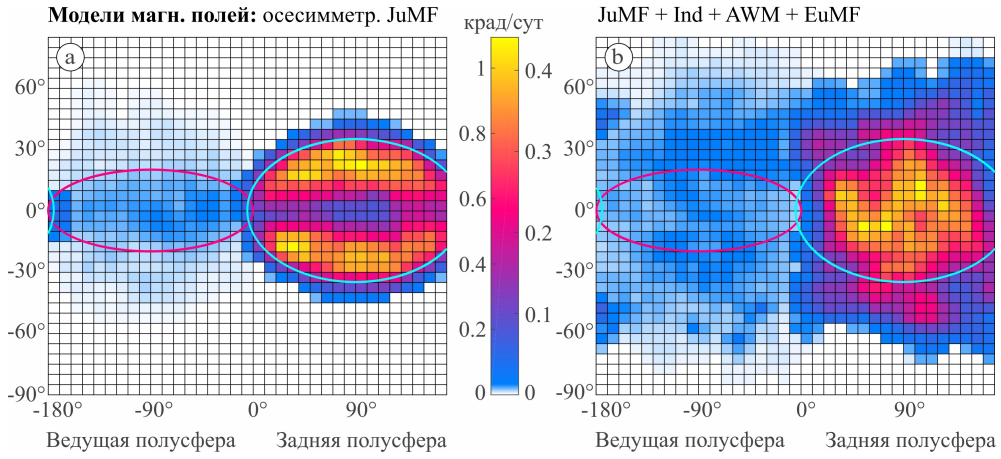


Рис. 1: Распределение радиации на поверхности Европы под слоем воды толщиной 2.5 г/см^2 для 2х различных моделей магнитного поля: (а) осесимметричный магнитный диполь Юпитера; (б) наклонный диполь Юпитера + альфвеновские крылья + индуцированное и внутренние поля Европы.

Для валидации модели мы сравнили результаты моделирования и приближения ведущего центра. Показано, что электроны, движущиеся исключительно в осесимметричном магнитном диполе Юпитера, концентрируются на поверхности Европы в ограниченных областях (Рис. 1а), которые соответствуют областям концентрации электронов в приближении ведущего центра. Области высыпания электронов на поверхность Европы в наклонном магнитном диполе Юпитера больше по размеру и концентрации частиц, чем области в осесимметричном магнитном диполе. Индуцированное поле снижает дозу радиации на поверхности Европы, увеличивая области их распространения. Крылья Альфвена не влияют на общую дозу радиации, но перераспределяют ее. А внутреннее магнитное поле Европы (если оно есть) даже небольшой интенсивности уменьшает и перераспределяет радиацию.

Михаил Игоревич Панасюк – путь в науке

Калегаев В.В.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Профессор Михаил Игоревич Панасюк, директор Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ, посвятил научным исследованиям более 50 лет своей жизни. Научные интересы М.И. Панасюка связаны с астрофизикой и физикой космоса: исследованием космической радиации, магнитосфер планет и космических лучей с помощью космических и наземных экспериментов. Им получены фундаментальные научные результаты в области исследования кольцевого тока и радиационных поясов в магнитосфере Земли. М.И. Панасюк – автор уникальных экспериментов на спутниках, которые привели к открытию нового явления в околоземном пространстве – формирования радиационного пояса Земли, состоящего из частиц аномальных космических лучей. В ходе экспериментов на борту спутников "Татьяна-1" (2005), "Татьяна-2" (2009), "Вернов" (2014), “Ломоносов” (2016) были получены экспериментальные результаты по экстремальным явлениям в атмосфере Земли: транзиентным электрическим разрядам в ее верхних слоях.

МИХАИЛ ИВАНОВИЧ ВЕРИГИН И ЛАБОРАТОРИЯ К.И. ГРИНГАУЗА

Котова Г.А., Безруких В.В.

.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kotova@iki.rssi.ru

Год назад ушел из жизни Михаил Иванович Веригин, руководивший Лабораторией межпланетной и околопланетной плазмы с 1988 г., лабораторией, созданной и возглавляемой на протяжении нескольких десятилетий профессором К.И. Грингаузом. 18 декабря 2020 г. не стало ведущего сотрудника лаборатории энтузиаста экспериментальных исследований космической плазмы Валерия Васильевича Афонина. В 2015 г. ушел из жизни также ведущий сотрудник лаборатории, человек, обладавший уникальным талантом физика-экспериментатора, Анатолий Петрович Ремизов.

Доклад посвящен памяти выдающегося ученого и очень хорошего человека М.И.Веригина, а также памяти всех ушедших сотрудников Лаборатории.

СТАРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ПОЛУЧЕННЫЕ ВБЛИЗИ МАРСА, В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ.

Бреус Т.К., Веригин, М.И., Котова Г.А

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, breus36@mail.ru

Почти 50 лет назад, в конце 1971 года, космический корабль Марс-3 был выведен на орбиту Марса. 21 января 1972 г. этот орбитальный аппарат зарегистрировал сильное (~ 27 нТл) и регулярное магнитное поле в районе ближайшего (~ 1500 км) приближения к дневной стороне планеты. Это наблюдение первоначально интерпретировалось Долгиновым и др. [1972] и Грингаузом и др. [1974] как свидетельство планетарного дипольного магнитного поля. Позже Рассел [1978] интерпретировал те же наблюдения как результат драпировки межпланетного магнитного поля, набегающего на марсианское препятствие. Последующие миссии к Марсу выявили особенности сложной марсианской магнитосферы и прояснили важную роль в ее формировании как мультипольного магнитного поля планетной коры, так и ионосферы планеты [Крымский, Бреус и др 2002]. В настоящее время сравнение данных, полученных Ш.Ш. Долгиновым с коллегами, с данными Mars Global Surveyor (MGS) [Acuña et al., 1998] показало, что Марс-3 наблюдал сильное и регулярное магнитное поле с таким же направлением и точно над областью самой сильной намагниченности марсианской коры в южном полушарии планеты. Таким образом, Марс-3 зарегистрировал магнитное поле марсианской коры в начале 1972 года, примерно за 25 лет до MGS. Локальные, но многочисленные магнитные аномалии, которые были обнаружены MGS, могут создавать эффективное крупномасштабное поле. Рассчитанный суммарный магнитный поток в 6-7 раз больше потока, ожидаемого от центрального диполя по оценке Acuna et al. [2001].

Около 30 лет назад вначале 1989 г. по данным космического аппарата Фобос-2 было обнаружено, что солнечный ветер существенно тормозится перед околопланетной ударной волной, как в подсолнечной области, так и в области терминатора. Это торможение было объяснено М.И. Веригиным и др. (Verigin et al., 1991; Kotova et al., 1997) нагружением солнечного ветра ионами кислорода, образующимися при ионизации атомов кислорода горячей короны Марса. Однако такое объяснение приводило к оценке плотности горячего кислорода в 5 раз превосходившей существовавшие в то время модельные расчеты плотности горячей кислородной короны. Измерения плотности горячего кислорода, выполненные на аппарате MAVEN в 2014 г. (Deighan et al. 2015), подтвердили оценки, сделанные по данным Фобоса-2.

Список литературы:

Грингауз К.И. и др. Космич. Исследов. Т. 12. № 4. С. 585-599. 1974.
Долгинов Ш.Ш. и др. Доклады АН СССР. Т. 207. № 6. С. 1296-1299. 1972.
Acuña M.H. et al. Science. V. 279. No. B12. P. 1676-1680. 1998
Acun˜a, M. H., et al., Magnetic field of Mars: Summary of results from the aerobraking and mapping orbits, J. Geophys. Res., 106, 23,403– 23,418, 2001..
Deighan et al. Geophys. Res. Lett. V. 42. P. 9009-9014. 2015.
Kotova G.A. et al. J. Geophys. Res. V. 102. No. A2. P. 2165-2173. 1997.
Russell C.T. Geophys. Res. Letters. V. 5. No. 1. P. 81-84. 1978.
Verigin M.I. et al. J. Geophys. Res. V. 96. No. A11. P. 19315-19320. 1991.
Krymskii A.M., Breus T.K. et al. // J. Geophys. Res. V. 107. No. A9. P. 1245. 2002.

ФИЗИЧЕСКАЯ АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОКОЛОПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Котова Г.А., Веригин, М.И., Безруких В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kotova@iki.rssi.ru

Разработана физическая аналитическая модель околопланетной ударной волны, основанная на теоретических МГД расчетах и точных аналитических решениях. Модель одинаково хорошо описывает ближнюю к планете подсолнечную и удаленную хвостовую области ударной волны, и ее удобно использовать для анализа различных физических явлений и экспериментальных данных. Аналитическое выражение, которым описываются положение и форма ударной волны включает 7 параметров: расстояние до подсолнечной точки, радиусы кривизны и затупленности в двух плоскостях: плоскости, содержащей вектора межпланетного магнитного поля и скорости набегающего потока, и перпендикулярной к ней; а также параметр, описывающий переход к асимптотическому наклону ударной волны на большом удалении за планетой. Дополнительным параметром модели является угол отклонения носовой точки ударной волны от направления на Солнце, возникающий помимо эффекта аберрации, когда межпланетное магнитное поле направлено под углом к скорости солнечного ветра. Такая асимметрия околопланетной ударной волны исчезает только в том случае, если магнитное поле солнечного ветра направлено вдоль или перпендикулярно вектору скорости. Асимптотический наклон ударной волны рассчитан теоретически в МГД приближении для любого направления межпланетного магнитного поля. Все параметры модели рассчитываются аналитически по параметрам препятствия в подсолнечной области: расстоянию до подсолнечной точки, радиусу кривизны и затупленности вблизи этой точки; и параметрам набегающего потока солнечного ветра: показателю политропы, звуковому и Альвеновскому числам Маха, углу между векторами магнитного поля и скорости солнечного ветра.

Работа выполнена при частичной поддержке Программой 28 ПРАН.

РЕЗОНАНСНОЕ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ В РАЗЛИЧНЫХ СЕКТОРАХ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Бадин В.И.

ИЗМИРАН, Москва, г. Троицк, badin@izmiran.ru

Высокоширотные доплеровские радарные наблюдения позволяют оценивать поперечную составляющую электрического поля магнитогидродинамических волн в диапазоне ультранизких частот (УНЧ). Вычисление спектральной плотности мощности (СПМ) радарных доплеровских измерений обнаруживает сильное падение СПМ на определенных частотах. Такие частоты интерпретируются как минимальные частоты резонансного поглощения УНЧ волн посредством возбуждения стоячих альфвеновских волн резонанса магнитных силовых линий. Возможны полуволновые и четвертьволновые собственные колебания в зависимости от того, какая доля длины волны укладывается вдоль силовой линии между сопряженными ионосферами. Резонансные колебания магнитных силовых линий формируют континуум собственных частот, в котором возможно определить его нижнюю частотную границу, соответствующую наиболее длинным силовым линиям. Количественно минимальная частота резонансного поглощения определяется методом наименьших квадратов посредством наилучшего приближения реального профиля СПМ, рассчитанного по данным наблюдений, модельным ступенчатым профилем, состоящим из средних значений спектральной мощности. Задача отыскания минимума функционала решается в определенном спектральном окне в диапазоне единиц миллигерц.

При обработке данных радарного мониторинга необходимо учитывать существование различных ветвей резонансного поглощения, обусловленных возбуждением в магнитосфере различных типов собственных колебаний, а также возможную неустойчивость задачи о минимуме функционала, что объясняется общей математической некорректностью таких задач. Преодолеть эти трудности возможно посредством последовательного пошагового сужения спектрального окна, в котором решается задача о минимуме функционала. Все полученные решения минимальной задачи сводятся в единую диаграмму. Диаграммный анализ спектрограмм радарных наблюдений позволяет оценить минимальные резонансные частоты полуволновых и четвертьволновых колебаний магнитных силовых линий, а также увидеть возможные неустойчивые решения минимальной задачи.

Были обработаны радарные наблюдения авроральной электроструи, которые проводились в течение одного солнечного оборота, предшествовавшего сильной магнитной буре 29.10.2003 г. Обнаружено, что в слабовозмущенных геомагнитных условиях изменчивость минимальных резонансных частот, усредненных по всем лучам радара, сравнительно невелика, хотя разброс значений таких частот между различными лучами может быть значительным. Основную изменчивость резонансного УНЧ поглощения в слабовозмущенных условиях можно объяснить попеременным переходом доминирующего поглощения с одного типа колебаний на другой, что, в свою очередь, обусловлено изменением того объема магнитосферной плазмы, в котором возбуждается данный тип колебаний. При этом обнаружено более частое доминирование полуволнового поглощения в том секторе межпланетного магнитного поля (ММП), в котором вектор ММП направлен от Солнца, и более частое доминирование четвертьволнового поглощения в секторе с противоположной полярностью ММП. Такие различия можно связать с киральностью траекторий ионов солнечного ветра и, соответственно, с различной вероятностью захвата этих ионов геомагнитным полем при различной полярности ММП. За день до магнитной бури наблюдалось хорошо выраженное доминирование четвертьволнового поглощения, и этот факт может иметь прогностическое значение.

Работа частично поддержана РФФИ, проект 20-05-00050.

СВЯЗЬ ДИНАМИКИ SAR-ДУГ С СУББУРЕВЫМИ ИНЖЕКЦИЯМИ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Иевенко И.Б., Парников С.Г., Сокольников А.В.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, ievenko@ikfia.ysn.ru

Стабильные авроральные красные (SAR) дуги являются следствием взаимодействия энергичных ионов кольцевого тока с холодной плазмой внешней плазмосферы (плазмопаузой) Принято считать, что SAR-дуги наблюдаются во время магнитных бурь, которые определяются по вариации геомагнитного индекса Dst. Наши исследования субаврорального свечения на меридиане Якутска показали, что SAR дуги появляются и/или уярчаются во время фазы расширения суббурь. Формирование SAR дуги начинается в экваториальной области границы диффузного сияния как результат быстрого проникновения энергичных ионов ассиметричного кольцевого тока в область внешней плазмосферы [1-3]. Ассиметричный кольцевой ток возникает как следствие суббуревой инжекции энергичных частиц. Инжекция происходит в ограниченном долготном секторе ночной магнитосферы и отображается в сияниях в виде авроральной выпуклости. Долготную протяженность выпуклости в сияниях можно определить по характерным возмущениям магнитного поля на средних широтах, которые обусловлены системой продольных токов суббури.

В этой работе представлены результаты одновременных наблюдений цифровыми камерами всего неба динамики сияний на станции Жиганск (GMLat 62º, GMLon 196º) и формирования SAR-дуги на субавроральной станции Маймага (GMLat 58º, GMLon 202º). Рассмотрены два события 21 марта 2017 и 15 февраля 2018 г., в которых фаза роста суббурь (усиление конвекции) началась после поворота Bz ММР к югу.

В первом случае центр начала фазы развития суббури находился в предполуночном секторе MLT с последующим расширением авроральной выпуклости в направлении полночи. Во втором более интенсивном событии фаза развития суббури началась в вечернем секторе 20-22 MLT с дальнейшим движением активной области в послеполуночные часы MLT. В обоих случаях наблюдалось формирование (уярчение) SAR-дуги в направлении от западного до восточного горизонта. Мы полагаем, что в этих событиях SAR-дуга отображала динамику перекрытия потока энергичных ионов с плазмопаузой как результат расширения области инжекции суббури и электрического дрейфа энергичной плазмы в восточном направлении.

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А17-117021450054-8 при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-45-140037 р_а.

1. Иевенко И.Б. // Геомагнетизм и аэрономия 1999. Т. 39. С .26.
2. Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. // Геомагнетизм и аэрономия 2004. Т. 44. С. 643.
3. Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. // Adv. Space Res. 2008. Vol. 41. P. 1252.

СТАТИСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА СПУТНИКЕ ERG (ARASE)

Чугунин Д.В., Колпак В.И., Могилевский М.М., Чернышов А.А., Моисеенко И.Л., Кумамото А., Тсучия Ф., Касахара Е., Шойи М., Миеши Е., Шинохара И.

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, dimokch@iki.rssi.ru

Проведен статистический анализ результатов измерения Авроральных Километрового Радиоизлучения (АКР), зарегистрированного в течение 20 месяцев на спутнике ERG (или Arase). Результирующая кривая хорошо совпадает с представлениями об изменении АКР в зависимости от местного времени и сезона. Из анализа т.н. «затекания» АКР на дневную сторону магнитосферы сделаны оценки раствора конуса излучения, которые, в целом, не противоречат ранее сделанным вычислениям по результатам измерений на спутниках ИНТЕРБОЛ-2 и POLAR. Статистические результаты, полученные на первом этапе работы в т.н. «ручном» режиме обработки, были дополнены результатами обработки, полученными при помощи специального программного обеспечения, что позволило получить информацию о зависимости характеристик АКР от точки измерений и геомагнитных условий.

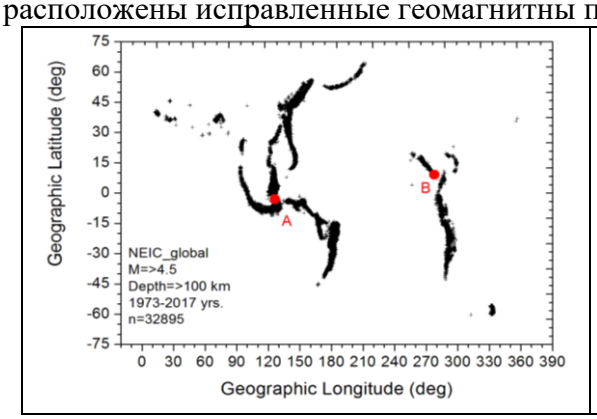
Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-29-21037).

СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ ДОЛГОТАМИ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ПОЛЮСОВ И ФОКУСОВ ГЛУБИННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ

Хачикян Г.Я.[1], **Пулинец С.А.**[2, 3]

[1]*ИИ, г. Алматы, Казахстан, galina.khachikyan@gmail.com*
[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, pulse@rssi.ru*
[3]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Высказанная в [1, 2] идея о связи процессов подготовки и реализации землетрясений с процессами функционирования глобальной электрической цепи и генерации атмосферного электрического поля, была недавно подтверждена в [3] результатами анализа данных о землетрясениях, зарегистрированных на планете в 1973–2017 гг (более 220 тысяч событий с магнитудой M≥4.5 из глобального сейсмологического каталога USGS). Получено уравнение линейной регрессии между UT-вариациями в градиенте электрического потенциала (кривая Карнеги) и в количестве глубокофокусных землетрясений с коэффициентом корреляции *R*=0.86, с опережением на 2 часа вариаций в сейсмических данных относительно электрического потенциала. Обращено внимание, что во время максимумов в UT-вариациях сейсмического режима и электрического поля в ~07–08 UT и ~17–19 UT, исправленные геомагнитные полюса северного и южного полушарий, соответственно, “смотрят” в хвост магнитосферы, откуда идет инжекция ускоренных заряженных частиц, а во время минимума в ~03 UT, исправленный геомагнитный полюс южного полушария, расположенный в долготном регионе самой высокой сейсмичности (Юго-Восточная Азия, Австралия) находится на дневной стороне и “отвернут” от потока ускоренных заряженных частиц из хвостовой части магнитосферы. Высказано предположение, что за возникновение UT-вариации в сейсмическом режиме Земли отвечает плазменная структура хвоста магнитосферы, которая «проектируется» вдоль магнитных силовых линий не только на авроральный овал, приводя к его постоянному существованию, но оказывает влияние и на внутриземные проводящие слои, что проявляется в тектонической активности планеты. Некоторым подтверждением этому является рисунок, демонстрирующий расположение в восточном и западном долготных секторах двух ветвей глубокофокусной сейсмичности, центральные точки которых (A, B - фокусы) расположены на тех же долготах, на которых расположены исправленные геомагнитны полюса в южном и северном полушариях Земли.



Распределение на планете эпицентров землетрясений с глубинами гипоцентров h≥100 км (32895 событий в 1973-2017гг).

A, B маркируют фокусы двух ветвей глубинной сейсмичности. Долготы расположения этих фокусов (126.19^{0}E и 277.67^{0}E) практически совпадают с долготами исправленных геомагнитных полюсов для эпох 1973-2017гг из https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html

[1] *Pulinets S.A.* Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults. Adv. Space Res. V. 44(6). P. 767–773. 2009.
[2] *Намгаладзе А.А.* Землетрясения и глобальная электрическая цепь. Химическая физика. Т. 32. № 9. С. 9–13. 2013.
[3] *Пулинец С.А., Г Я. Хачикян,* Унитарная вариация в сейсмическом режиме Земли: соответствие кривой Карнеги. Геомагнетизм и аэрономия. Т. 60. № 6. С. 803–808, 2020.

Пространственно-временная структура высыпаний энергичных электронов по данным аэростатных наблюдений и измерений полярных спутников в 2015-2017 гг.

Калегаев В.В.[2], Кугушева А. Д.[1], Власова Н.А.[2], Петров К.А.[1], Базилевская Г.А.[3], Махмутов В.С.[3]

[1] Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
[2] Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
[3] ФИАН г. Москва, Россия.

klg@dec1.sinp.msu.ru

Высыпания в атмосферу энергичных электронов являются ярким проявлением динамики внешнего радиационного пояса магнитосферы Земли. Основная часть высыпаний происходит во время геомагнитных возмущений, связанных с взаимодействием магнитосферы с высокоскоростными потоками солнечного ветра. Усиление геомагнитной активности в магнитосфере приводит к генерации волн, обеспечивающих рассеяние захваченных электронов внешнего радиационного пояса и их высыпание в конус потерь.

Для отдельных событий, связанных с высыпаниями электронов внешнего радиационного пояса Земли, зарегистрированных в 2015-2017 гг. в ходе аэростатных экспериментов ФИАН в Мурманской области (L=5.5), проведен анализ пространственно-временных характеристик и динамики высыпаний электронов с энергиями до 1 МэВ по измерениям потоков электронов на ИСЗ “Метеор М2” и POES. По соотношению потоков электронов, измеренных вертикальным и горизонтальным детекторами на ИСЗ, были идентифицированы высыпания частиц, соответствующие событиям, зарегистрированным в ходе аэростатных экспериментов. Высыпания обнаружены на L-оболочках от 4 до 7, как в северном полушарии, над Мурманской областью, так и в южном, магнитосопряженном, регионе. Для каждого из рассмотренных событий определена приэкваториальная область в магнитосфере, где, преимущественно, действуют механизмы, ответственные за рассеяние электронов и их вторжение в атмосферу Земли.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 19-05-00960.

ДИНАМИКА РАДИАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В НОЯБРЕ-ДЕКАБРЕ 2020 ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ «МЕТЕОР-М» И «ЭЛЕКТРО-Л»

И.Н. Мягкова[1], **А.В. Богомолов**[1], **В.Е. Еремеев**[1], **А.О. Ширяев**[1], **Е.А. Гинзбург**[2]

1- *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва, Россия,* irina@srd.sinp.msu.ru
2- *Институт прикладной геофизики им. Академика Е.К. Федорова, Москва, Россия*

Возможность оперативного контроля радиационных условий в околоземном космическом пространстве (ОКП) весьма актуальна как для решения научных задач солнечно-земной физики, так и для обеспечения безопасности космических миссий и авиационных полетов.

Отдельный интерес с этой точки зрения представляют данные с низковысотных космических аппаратов (КА) с круговой полярной орбитой. На сегодня в распоряжении исследователей имеются данные большого количества космических экспериментов, в том числе и с КА с полярными орбитами, функционирующих на высотах до 1000 км. В настоящий момент дают данные такие КА как серии «Метеор-М» и ИСЗ серии POES NOAA.

Однако, из-за специфики поступающей с полярных КА информации, которая связана с особенностями орбиты - КА последовательно проходит разные области магнитосферы Земли - для оперативного анализа радиационных условий на высотах 300-1000 км, позволяющего сравнивать данные полярных КА с мониторинговыми измерениями потоков заряженных частиц на геостационарной орбите, необходима специальная система, позволяющая анализировать данные низковысотных КА на разных частях орбиты.

В настоящей работе был выполнен сравнительный анализ данных российских спутников о вариациях радиационной обстановки в ОКП в течение ноября-декабря 2020 года. Тогда помимо вариаций потоков и спектров электронов внешнего радиационного пояса Земли в результате воздействия высокоскоростного потока солнечного ветра, произошли первые значимые солнечные протонные события (СПС) нового, 25-го солнечного цикла - 29 ноября и 7 декабря 2020. Обсуждаются отличия в реакции на бурю электронов разных энергий на разных L-оболочках, а также изменение радиационных условий в ОКП во время упомянутых СПС.

KEV ELECTRONS IN THE INNER EARTH'S MAGNETOSPHERE

Ganushkina N. Yu.

Finnish Meteorological Institute, POBox 503, Helsinki, FI-00101, Finland, Natalia.Ganushkina@fmi.fi

The fluxes of electrons with energies < 100 keV are not usually analyzed and modeled in details when studying the electron radiation belts. These fluxes constitute the low energy part of the seed population, which is critically important for radiation belt dynamics. Moreover, energetic electrons with energies less than about 100 keV are responsible for hazardous space-weather phenomena such as surface charging. The electron flux at these energies varies highly with geomagnetic activity and even during quiet-time periods. Significant variations in the low-energy electrons can be seen during isolated substorms, not related to any storm periods. Moreover, electron flux variations depend on the electron energy. Statistical analisys of AMC 12 CEASE II ESA instrument data (5-50 keV) and GOES MAGED data (40, 75, 150 keV) have revealed that electron fluxes increase by the same order of magnitude during isolated substorms with 200 nT of AE index and storm-time substorms with 1200 nT of AE index. Another factor of crucial importance is the specification of boundary conditions in the electron plasma sheet. We developed a new model for electron number density and temperature in the plasma sheet as dependent on solar wind and IMF conditions based on THEMIS data analysis. We present observational and modeling results on low energy electrons in the inner magnetosphere with newly-developed, time-dependent boundary conditions with a special focus on the role of substorms for electron transport and acceleration.

DATA MINING RECONSTRUCTION OF MAGNETOTAIL RECONNECTION

Sitnov M.I.[1]), Stephens G.K.[1]), Motoba T.[1]), Swisdak M. [2])

[1])JHU/APL, Laurel, USA, mikhail.sitnov@jhuapl.edu, [2])University of Maryland, College Park, USA

In this study, we investigated the magnetotail reconnection picture using modern data-mining methods. They allow us to employ for reconstruction not only the magnetic field measurements available at the moment of interest but also other events in the historical database when the magnetosphere was in similar global states (substorm phases) [1,2]. Data mining reveals two reconnection regions (X-lines) with weak and strong changes of the magnetic field geometry. According to the Faraday's law, they represent steady and transient reconnection regimes. It is found that in the mid tail (~30 R_E from Earth, where R_E is the Earth's radius) reconnection is steady, whereas closer to Earth (~20R_E) it is transient. It is found that a similar combination of steady and transient reconnection processes can be reproduced in kinetic particle-in-cell simulations of the magnetotail current sheet. Simulations show that the steady reconnection appears after the demagnetization of electrons. It has classical signatures of fast collisionless reconnection revealed in a series of simulations using ad hoc external perturbation of the current sheet with antiparallel magnetic field lines and known as the GEM Magnetic Reconnection Challenge [3]. In contrast, the unsteady reconnection starts from the spontaneous formation of a dipolarization front with magnetized electrons and dissipation provided by ions, as was originally suggested by Schindler, Galeev and Zelenyi in their models of substorms [4,5]. The near-Earth X-line in this process forms due to the flux starvation in the trailing region of the dipolarization front as was revealed in more recent PIC simulations of the ion demagnetization-mediated reconnection [6-8].

1. Stephens G. K. et al. // J. Geophys. Res. 2019. V. **124.** P. 1085.
2. Sitnov M. I. et al. // J. Geophys. Res. 2019. V. **124.** P. 8427.
3. Birn J. et al. // J. Geophys. Res. 2001. V. **106.** P. 3715.
4. Schindler K. // J. Geophys. Res. 1974. V. **79.** P. 2803.
5. Галеев А.А., Зелёный Л.М. // ЖЭТФ 1976. Т. **70**. С. 2133.
6. Sitnov M. I. et al. // Geophys. Res. Lett. 2013. V. **40.** P. 22.
7. Bessho N., Bhattacharjee A. // Phys. Plasm. 2014. V. **21.** P. 102905.
8. Pritchett P. L. // Phys. Plasm. 2015. V. **22.** P. 062102.

OBSERVATIONS OF MIRROR MODE STRUCTURES IN THE DAWN-SIDE MAGNETOSPHERE

L. A. Avanov, M. O. Chandler, V. N. Coffey, B. L. Giles, T. E. Moore,
C. J. Pollock, J. L. Burch, C. T. Russell, R. B. Torbert

University of Maryland/NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, USA, levon.a.avanov@nasa.gov

We present observations of mirror mode structures in the dawn-side magnetosphere from theMagnetospheric Multiscale Mission (MMS). The observations were made during a period ofrelatively stable northward interplanetary magnetic field (IMF) conditions. We observedmagnetic troughs only with reductions of up to 90% in the magnitude of the local magnetic field. The structures were closely aligned with the local magnetic field and had sizes perpendicular tothe magnetic field of the order of 1 R_E and ion densities up to twice that of the surroundingregions.

We used ion, magnetic field, and electric field data to examine the plasma conditions inside and outside of these structures to investigate the stability and evolution of the structures and estimate the magnitude of changes in the ion distributions. Comparing the ion bulk properties to theoretical predictions we concluded that variations in the parameters with trough depth were due to the spacecraft traversing them at different locations along their length.

Our calculations of heating and cooling of the ions at different pitch angles is consistent with theory. We conclude that these troughs were likely long-lived, quasi-stable structures that originated in the magnetosheath near the nose of the magnetopause and were captured into the magnetosphere by dual-lobe re connection.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ

Безруких В.В., Котова Г.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, vbez@iki.rssi.ru

По данным спутников МАГИОН-5 и ИНТЕРБОЛ-1 проанализированы характеристики холодной плазмы в пограничном слое плазмосферы. Положение плазмопаузы и толщина слоя определялись по вариациям плотности плазмы в зависимости от параметра Мак Иллвайна. Температура плазмы в слое обычно возрастает, при этом изменения температуры происходят более плавно, чем изменения плотности. Скорость возрастания температуры увеличивается с уменьшением толщины слоя. По данным широкоугольных анализаторов плазмы температуру протонов в пограничном слое можно оценить только в том случае, когда энергетическое распределение удается описать максвелловской функцией, плотность ионов при этом обычно больше 50 см$^{-3}$. Не наблюдалось возрастания температуры выше $5x10^4$ °К. В отдельных случаях после пересечения плазмопаузы и выхода из плазмосферы температура плазмы не менялась. Причины различных вариаций температуры плазмы в пограничном слое, возможно, связаны с геомагнитной активностью.

ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА И БУРЕВЫХ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

Власова Н.А., Калегаев В.В., Назарков И.С.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, nav19iv@gmail.com

Магнитосфера Земли – самосогласованная система, сформированная магнитным полем Земли под воздействием межпланетной среды. Наиболее значительные изменения внешнего электронного радиационного пояса (РП) Земли наблюдаются во время геомагнитных бурь, поэтому естественно сделать заключение, что вариации магнитосферного магнитного поля должны быть одним из главных факторов, управляющих динамикой потоков электронов внешнего РП. Экспериментальное подтверждение зависимости динамики потока релятивистских электронов внешнего РП Земли от вариаций магнитного поля во время бурь было впервые представлено в работе [1]. Вариации внешнего электронного РП могут происходить при сохранении адиабатических вариантов при условии относительно медленных изменений геомагнитного поля по сравнению с характерными временами движения электронов. Именно такая ситуация может наблюдаться во время геомагнитной бури. При этом регистрируются изменения потоков электронов, не связанные с реальными потерями частиц. Результаты анализа динамики функции плотности в фазовом пространстве электронов для периода 31.I-05.II 2016 г. показали, что высыпания электронов внешнего РП, обусловленные взаимодействием «волна-частица», незначительны, тогда как радиальная диффузия наружу – главная причина падения потока электронов на внешних L-оболочках [2].

Не до конца решенная проблема – влияние факторов межпланетной среды на динамику внешнего электронного РП. В работе [3] делается предположение, что для роста интенсивности потоков электронов внешнего РП Земли необходимым условием является южная ориентация межпланетного магнитного поля, при этом продолжительный период устойчивой ориентации электрического поля «утро-вечер» в ночной магнитосфере, определяемого функцией связи ($-B_z \cdot V_{sw}$), способствует движению электронов вглубь РП.

В данной работе представлены результаты исследования зависимости динамики потоков релятивистских электронов внешнего РП Земли от интенсивности геомагнитной бури. Рассмотрены геомагнитные бури в широком диапазоне $|Dst|_{max}$ – вариаций. Исследования основаны на экспериментальных данных по потокам электронов с энергией ~2 МэВ, полученных с космического аппарата *Van Allen Probe (VAP)* в сердцевине РП Земли и с ИСЗ *GOES* на геостационарной орбите.

Результаты сопоставления динамики потоков электронов на разных орбитах и вариаций геомагнитного поля позволяют сделать вывод о том, что основными механизмами эволюции внешнего электронного РП Земли являются глобальные процессы: перемещение популяции захваченных электронов наружу и внутрь магнитосферы Земли вследствие крупномасштабных вариаций магнитосферного магнитного поля во время геомагнитных возмущений и дрейф электронов из хвоста магнитосферы вглубь РП под воздействием электрического и магнитного полей. Локальное ускорение частиц носит вспомогательный характер в динамике радиационных поясов Земли.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 115041410195, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00960

1. Тверская Л.В. // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т. 26. С. 864-865.
2. Wu H., Chen T., Kalegaev V.V., Panasyuk M. I., et al. // JGR. 2020. V. 12. N 10.
3. Власова Н.А., Калегаев В.В., Назарков И.С., Прост А. // Геомагнетизм и аэрономия. 2020. Т. 60. № 1. С. 9-22.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ SC В ДНЕВНОМ СЕКТОРЕ ПОЛЯРНЫХ ШИРОТ

Громова Л.И., Громов С.В., Клейменова Н.Г., Малышева Л.М.

ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия, gromova@izmiran.ru

Анализировались дневные высокоширотные магнитные бухтообразные возмущения, вызванные SC. Ранее геомагнитные эффекты SC, главным образом, исследовались в средних и низких широтах, в то же время эффекты в полярных широтах изучены недостаточно. Согласно каталогу SC, представленном Международной службой геомагнитных индексов - ISGI (International Service of geomagnetic Indices - http://isgi.unistra.fr), в 24 цикле солнечной активности (2009 – 2019 г.) было зарегистрировано 95 событий SC. Из них были выбраны 27 SC-событий в интервале 06-12 UT, когда цепочка магнитометров скандинавского профиля IMAGE находилась в дневном секторе (09 - 15 MLT). Анализ наземных магнитных наблюдений показал, что высокоширотный геомагнитный SC-эффект определяется направлением межпланетного магнитного поля (ММП) и свойствами потоков солнечного ветра. Было установлено, что при северном направлении ММП развивались дневные полярные возмущения, которые наблюдались только на геомагнитных широтах ≥ 70°. При южном направлении ММП SC-события сопровождались небольшими магнитными возмущениями в дневном секторе полярных широт также на геомагнитных широтах ≥ 70°. которые сопровождались классическими суббурями в ночном секторе Земли.

ГИСТЕРЕЗИС В ПОРОГАХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ БУРИ 7-8 НОЯБРЯ 2004 Г.

Данилова О.А., Птицына Н.Г., Вернова Е.С., Тясто М.И.

СПбФИЗМИРАН, г. Санкт-Петербург, Россия, md1555@mail.ru

Исследована зависимость изменения жесткостей геомагнитного обрезания (ΔRэф) от параметров солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП) и магнитосферы в процессе развития сильной магнитной бури 7–8 ноября 2004 г. Получено, что ΔRэф зависит не только от варьируемого аргумента — параметров геомагнитной активности и межпланетной среды, но и от направления изменения аргумента. В процессе эволюции бури с развитием главной фазы и последующей восстановительной фазы исследуемые параметры гелио- и геомагнитосферы изменяются циклическим образом. В соответствии с этим траектория ΔRэф, т.е. последовательные значения, которые принимает ΔRэф в зависимости от исследуемых параметров, во время развития токовых систем в главной фазе не совпадает с траекторией во время распада токовых систем в восстановительной фазе — формируются петли гистерезиса. Найдено, что для связи ΔRэф с геомагнитными индексами и скоростью СВ (V) отмечены узкие петли а с электромагнитными параметрами — широкие. Широта станции КЛ влияет на форму гистерезисной петли. Верхние точки на петле гистерезиса, в которых |ΔRэф| близка к 0 (перед бурей), расположены практически одинаково для всех станций, а нижняя точка на петле гистерезиса (максимум бури в конце главной фазы) — это максимум |ΔRэф|, который увеличивается с увеличением широты, растягивая петлю. В максимуме бури на низких широтах (ст. Токио) наблюдается максимальное падение ΔR порядка −0.8 ГВ, которое достигает −1.5 ГВ на высоких широтах (ст. Москва, Иркутск и Хобарт). Эти значения определяют размер петли гистерезиса для исследуемой станции.

Наши результаты свидетельствуют о том, что характеристики сформированных петель гистерезиса отражают специфику взаимодействия СВ и магнитосферы в процессе эволюции токовых систем во время исследуемой магнитной бури. Можно заключить, что полученный нами гистерезис связан с тем фактом, что накопление энергии при развитии кольцевого тока на главной фазе бури и ее высвобождение на восстановительной фазе происходило не симметрично, часть энергии не восстанавливалась. Другие токовые системы, которые развиваются и затухают на разных временных масштабах, также могли вносить асимметричный вклад в процесс эволюции бури. Однако на данном этапе остается невыясненным, какая именно токовая система в общем случае стоит за полученными параметрами гистерезиса. Определение однозначных зависимостей ΔRэф от конкретной токовой системы на каждом этапе бури является сложной нерешенной задачей, так как к настоящему времени взаимодействие солнечного ветра и магнитосферы, которое контролирует вариации ΔRэф еще плохо понято. Для выяснения физической сути явлений, определяющих возникающий гистерезис, в первую очередь необходимо наличие гораздо большего статистического материала. Мы предполагаем заняться созданием архива данных о гистерезисе по разным бурям и анализом этого материала в следующих работах.

НАБЛЮДЕНИЯ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ СИСТЕМЫ КАМЕР MAIN И СПУТНИКУ THD В ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ

И.В. Дэспирак, Т.В. Козелова, Б.В. Козелов, А.А. Любчич

Полярный геофизический институт (ПГИ) г. Апатиты, Мурманская область, Россия, despirak@gmail.com

24 декабря 2014 наблюдался интересный случай пространственно-временной динамики суббуревых активизаций (AL ~ 800 нТл), когда были одновременные наблюдения на спутнике THEMIS D в плазменном слое и наземные наблюдения на Кольском полуострове. Полярные сияния наблюдались системой MAIN в Апатитах, магнитные возмущения регистрировались магнитометрами станций IMAGE и обсерваторией Ловозеро (LOZ). Более подробно мы рассматриваем суббуревую активность в интервале ~ 19:00 до ~ 20:00 UT, когда спутник THD находился на расстоянии |X| ~ 6 R_E в плазменном слое и его проекция пересекала Кольский полуостров. В этом интервале на станции Ловозеро было зарегистрировано три пика в пульсациях Pi1B, связанные с уярчениями дуг вблизи LOZ. Первый пик наблюдался в связи с появлением в сияниях структур типа «бусинок» на дуге на предварительной фазе (the ‘growth phase arc’) южнее широты LOZ. Второй и третий пики в пульсациях Pi1B были связаны с взрывной фазой суббури. В интервале 19:30 - 19:56 UT спутник наблюдал три фронта диполизации, которые были связаны с уярчениями дуг вблизи проекции спутника и общим движением сияний к северу. Эти наблюдения фронтов диполизации, совместно с одновременными наблюдениями пиков пульсаций в Ловозеро свидетельствует о начале и развитии брейкапа во время взрывной фазы суббури. Это событие интересно тем, что согласно данным магнитометров AND-KEV-IVA-LOZ-SQD развитие суббуревой инжекции происходит вблизи разрыва Харанга, и мы можем проследить развитие сияний для этого случая по данным камеры всего неба в Апатитах. В конце предварительной фазы (~18:31:50 UT) наблюдалось уярчение самой экваториальной из всех дуг. После этого на дуге формируются азимутально - разнесенные авроральные складки, движущиеся с востока на запад. Это соответствует первой фазе брейкапа (псевдо-брейкапу), который обычно состоит из внезапного уярчения дуги и экспоненциального роста ее интенсивности до насыщения. Далее в момент 18:33:50 UT самая экваториальная дуга снова стала ярче, а после ~ 18:34:19 UT, эта дуга начала быстро расширяться к полюсу. Подобный процесс образование вихря и его пространственное расширение традиционно называют авроральным брейкапом. Наблюдаемое в Апатитах развитие сияний совпадает с существующими представлениями о начале развития суббури вблизи разрыва Харанга, когда движение предбрейкаповых авроральных форм сияний связано с предшествовавшей картиной ионосферной конвекции и с формированием в плазменном слое потокового канала, который впоследствии приводит к развитию неустойчивости в околоземном плазменном слое. В сияниях это должно проявляться как интенсификация сияний, которая происходит в течение ~ 10 сек на участке дуги, протяженностью около 1 часа MLT, с распределенными по долготе волнообразными образованиями.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОИСХОДЯЩИХ В АТМОСФЕРАХ ПЛАНЕТ ПОДОБНЫХ ГОРЯЧИМ ЮПИТЕРАМ

Ефимов М.А., Чибранов А.А., Руменских М.С., Березуцкий А.Г., Посух В.Г., Трушин П.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, mikle3496@gmail.com

В данной работе приведен анализ взаимодействия плазменных потоков в эксперименте по моделированию натекания звездного ветра на атмосферу горячего Юпитера. В вакуумную камеру стенда КИ-1 подается излучение импульсного CO_2-лазера, которое разделяется на два пучка и фокусируется на парно расположенных на корпусе магнитного диполя (10^6 Гс*см^3) C_2H_4-мишенях. Получающийся поток лазерной плазмы моделирует сверхзвуковое истечение верхней атмосферы горячего Юпитера. Данная схема опытов была впервые реализована в [1]. Моделирование звездного ветра происходит посредством облучения третьим лазерным пучком мишени, расположенной в 53 см от диполя. Возмущения плазменных потоков регистрировались зондами Ленгмюра и магнитными зондами. Также измерялся полный продольный ток, замыкающийся в полярных областях магнитосферы и трансполярный потенциал, с использованием поясом Роговского и медных пластин, расположенных непосредственно в местах абляции лазерного излучения на диполе, способом описанном в [2].

Полученные данные показывают, что величина дипольного магнитного поля оказывает прямое влияние на трансполярные токи и потенциалы, генерируемые облаками лазерной плазмы. Были измерены угловые распределения взаимодействующих плазменных сгустков, проанализированы относительные концентрации сформированного вокруг диполя облака плазмы к натекающему потоку плазмы на разных расстояниях и при разной величине дипольного поля. При анализе углового распределения обнаружена асимметрия взаимодействующих потоков, что свидетельствует о сложной нелинейной структуре взаимодействия.

Результаты работы позволят лучше понимать структуру и динамику взаимодействующих плазменных сгустков и токов в магнитосфере горячих Юпитеров, и в дальнейшем могут быть полезны при численном моделировании процессов протекающих в магнитосферах подобных планет.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 18-12-00080 и при поддержке грантов РФФИ № 18-2921018, 20-02-00520 и гранта Минобрнауки 075-15-2020-780.

1. Shaikhislamov, I. F., Posukh, V. G., Melekhov, A. V., Prokopov, P. A., Boyarintsev, E. L., Zakharov, Y. P., & Ponomarenko, A. G. // Plasma Physics and Controlled Fusion 2016, **58(11)**, 115002.

2. Shaikhislamov, I. F., Antonov, V. M., Zakharov, Y. P., Boyarintsev, E. L., Melekhov, A. V., Posukh, V. G., & Ponomarenko, A. G. // Cosmic Research 2014, **52(4)**, 278-288.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ СВЕРХСЖАТИЯ И ЗАЩИТЫ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЫБРОСОВ ПЛАЗМЫ АНОМАЛЬНО-БОЛЬШОЙ ЭНЕРГИИ НА СОЛНЦЕ

Захаров Ю.П., Пономаренко А.Г., Антонов В.М., Посух В.Г., Бояринцев Э.Л., Шайхисламов И.Ф., Терехин* В.А.

*ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ki1z@mail.ru; *ВНИИЭФ, г. Саров, Россия*

На крупномасштабном (∅1,2 м длиной 5 м) лазерном стенде КИ-1 (Космические Исследования - 1) в Институте Лазерной Физики, с начала 90^x-годов реализуется Программа лабораторного моделирования глобальных возмущений магнитосферы Земли под действием выбросов (сгустков) плазмы большой эффективной энергии E, как внутри нее, так и снаружи, как, например, при солнечных вспышках, в виде Корональных Выбросов Массы (КВМ). В результате, впервые были установлены [1-4] такие основные критерии подобия задачи, как энергетический $K = 3E*R_0^3/\mu^2$ и степень замагниченности ионов сгустков (с «направленным» Лармором $R_L \propto V_0$, их скорости разлета) в магнитном поле $B_d = \mu/R^3_{mp}$ диполя μ. Это поле рассчитано на расстоянии $R^*_{mp} \approx R^*_m = 0{,}7\sqrt{R_0\left(\mu^2/E\right)^{1/3}}$ смещенного к диполю, нового положения магнитопаузы, в сравнении с ее стационарным положением в Солнечном Ветре (СВ) на R_{mp}. Здесь традиционное расстояние $R_{mp} = (\mu^2/4\pi n_* m_* V_*^2)^{1/6}$ для всех параметров СВ (со звездочками), а R_0 – расстояние от центра диполя до точки инжекции сгустков (Лазерной Плазмы – ЛП, с E до кДж). Приведенное соотношение для масштаба R^*_{mp} новой, “Искусственной” Магнитосферы (ИМ) было впервые проверено в ЛП-опытах на КИ-1 [5, 6, 8] без потока фоновой плазмы (имитирующей СВ), а в последствие и в опытах с фоном [7], где было зарегистрировано 2^x-кратное сжатие магнитопаузы с соответствующим увеличением поля внутри нее в 8 раз. В настоящее время исследуется возможность постановки модельных опытов в еще более сложных условиях, с размещением перед основным диполем дополнительного - μ^*, с целью проверки реальной эффективности возможного (в будущем [9]) способа защиты магнитосферы Земли от сверх-энергичного КВМ (способного сжать ее в 2 и более раз).

1. Захаров Ю.П., Никитин С.А., Пономаренко А.Г. // Вычислительные Технологии, 1996 Т. **1** № 3, С. 36.
2. Ponomarenko A.G., Zakharov Yu.P., Nakashima H., Antonov V.M., Melekhov A.V. , Posukh V.G., Shakhislamov I.F., Muranaka T., Nikitin S.A. // Adv. Space Res. 2001. V. **28**. P. 1175 and 2002. V. **29**. P. 1335.
3. Zakharov Yu.P. // IEEE Trans. Plasma Science 2003. V. **31**. №6, Pt.1, P. 1243.
4. Ponomarenko A. G., Zakharov Yu. P., Antonov V. M., Melekhov A.V. , Posukh V.G., Shakhislamov I.F., et al. //Ibid 2007. V. **35**. P. 813.
5. Ponomarenko A. G., Zakharov Yu. P., Antonov V. M., V M, Melekhov A.V. , Posukh V.G., Shakhislamov I.F., et al. // Plasma Phys. Contr. Fusion 2008. V. **50**. #074015.
6. Zakharov Yu. P., Antonov V. M., Melekhov A.V. , Posukh V.G., Shakhislamov I.F., Ponomarenko A. G., Nakashima H., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2008. V. **112**. #042011.
7. Zakharov Yu. P., Ponomarenko A. G., Antonov V. M., Melekhov A.V. , Posukh V.G., Shakhislamov I.F., et al. // Ibid 2016. V. **688**. #012129.
8. Zakharov Yu. P. Ponomarenko A. G., Horton W., et al. // Astrophys. Space Sc. 2009. V. **322**. P. 151.
9. Lingam M., A. Loeb // Astrophys. J. 2017. V. **848**. #41; arXiv:1708.04241v3 and arXiv preprint arXiv:1709.05348. 2017.

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА β НА ДИНАМИКУ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Зотов О.Д., Клайн Б.И., Куражковская Н.А.

Геофизическая обсерватория "Борок" ИФЗ РАН, п. Борок, Россия, ozotov@inbox.ru

Исследована динамика параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) во время развития около 2000 геомагнитных бурь. Для этого использовался каталог геомагнитных бурь из Мирового Центра Данных по Солнечно-Земной Физике (http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagnetic_storms.ru.html) и база данных OMNI (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/) за период с 1964 по 2010 годы. Анализ выполнялся методом наложения эпох на интервале 48 часов до и 168 часов после начала бурь (за репер выбиралось время начала бурь из каталога). Селекция геомагнитных бурь проводилась по типу начала бурь (внезапное или постепенное) и по интенсивности (слабые, умеренные и сильные), исходя из данных каталога. Динамика параметров солнечного ветра и ММП сопоставлялась с вариацией Dst индекса, традиционно используемого для характеристики интенсивности и фаз развития геомагнитных бурь.

Показано, что из всех параметров межпланетной среды динамикой Dst индекса независимо от типа начала бурь и их интенсивности управляет β параметр (β - отношение плазменного давления к магнитному) солнечного вера. Наиболее геоэффективные параметры, такие как Bz-компонента и динамическое давление солнечного ветра, подверженные резким флуктуациям вблизи начала бурь, восстанавливаются к фоновым значениям достаточно быстро в течение примерно 48 часов после начала бурь. Однако фаза восстановления бурь (Dst индекса) продолжается до 5–7 суток. Обнаружено, что динамика Dst индекса и β параметра практически идентична в отличие от других параметров солнечного ветра и ММП. Характерное время восстановления β параметра совпадает с продолжительностью фазы восстановления бурь.

Динамика Dst индекса и β параметра для бурь различной интенсивности с внезапным и постепенным началом приведена на рис. 1 и 2, соответственно.

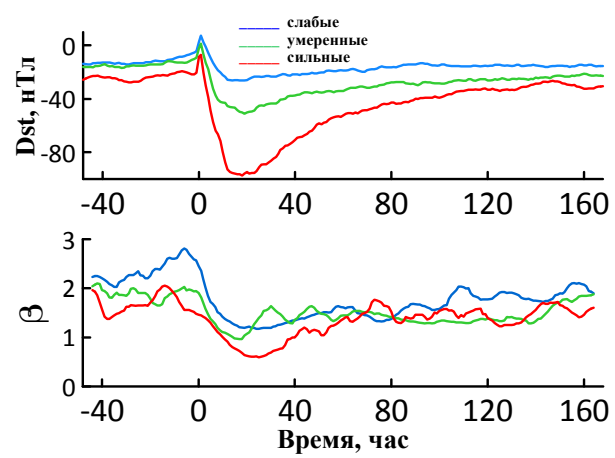


Рис. 1. Бури с внезапным началом

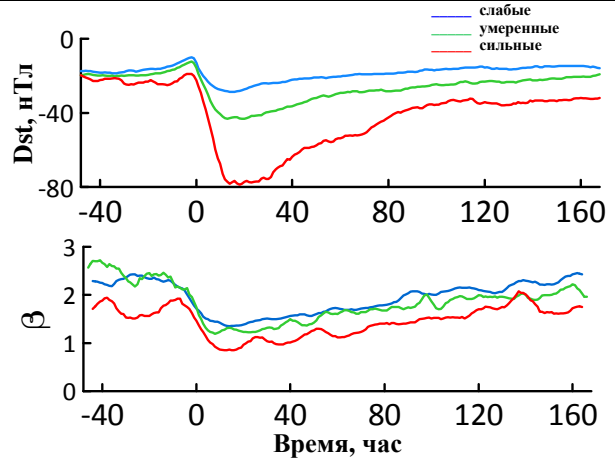


Рис. 2. Бури с постепенным началом

Установлено, что в фазу развития бурь величина β параметра близка к 1, что соответствует максимуму турбулентности флуктуаций плазмы солнечного ветра. В фазе восстановления β возвращается к фоновым значениям ~ 2–3. Судя по оценкам величины параметра β, турбулентность плазмы солнечного ветра может играть значительную роль в процессе развития геомагнитных бурь.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0144-2014-00116.

ДОЛГОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1

Довбня Б.В., Клайн Б.И., Куражковская Н.А.

Геофизическая обсерватория "Борок" ИФЗ РАН, п. Борок, Россия, klain@borok.yar.ru

По данным синхронного наблюдения УНЧ-вариаций в период с 1996 по 2001 годы на обсерваториях Монды (51.6° N, 100.9° E) и Борок (58.1° N, 38.2° E), разнесенных по геомагнитной долготе на 60 градусов, исследованы особенности пространственно-временного поведения геомагнитных пульсаций типа Pc1. В результате спектрально-временного анализа УНЧ-колебаний в диапазоне частот 0.1–3 Гц обнаружен эффект запаздывания или опережения начала когерентных серий Pc1 на обсерватории Борок по отношению обс. Монды. В 63% случаев режим пульсаций Pc1 в обс. Борок начинался позже, чем в обс. Монды и в 37% случаев раньше по сравнению с обс. Монды. Ниже приведены примеры, соответственно, запаздывания (рис. 1) и опережения (рис. 2) начала серий жемчужин в Борке относительно обс. Монды.

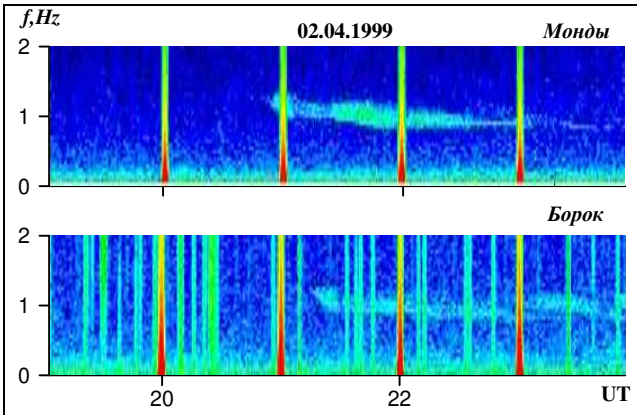


Рис. 1. Пример запаздывания начала серии Pc1 в Борке

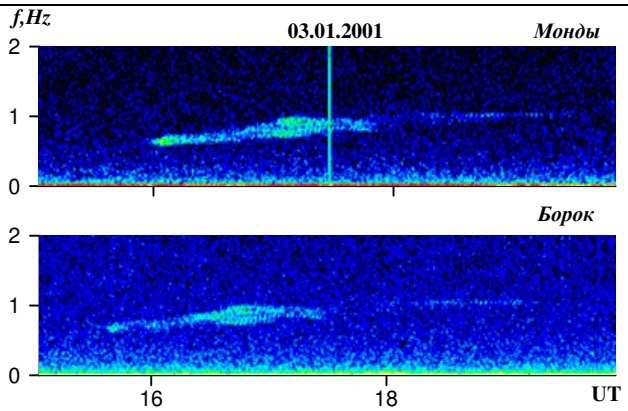


Рис. 2. Пример опережения начала серии Pc1 в Борке

Сопоставление динамических спектров одновременных наблюдений пульсаций Pc1 на двух обсерваториях показало, что величина запаздывания (Δt_{BM}) начала пульсаций лежит в интервале $20 < \Delta t_{BM} < 40$ минут. Характерные времена опережения (Δt_{MB}) принадлежат диапазону $5 < \Delta t_{MB} < 15$ минут. Одной из особенностей полученных спектров является присутствие различного тренда средней частоты пульсаций, который отчетливо прослеживается на приведенных выше рисунках. Так, в случае запаздывания средняя частота Pc1 понижается при развитии серии, обратную ситуацию мы наблюдаем при опережении. Возможное объяснение обнаруженных эффектов - особенности дрейфа протонов на фазе восстановления геомагнитных бурь.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0144-2014-00116, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-05-00574.

ВЫСОКОШИРОТНЫЙ ЭФФЕКТ МАГНИТНОГО ОБЛАКА 25 ИЮНЯ 2015 г.

Клейменова Н.Г., Громова Л.И., Громов С.В., Малышева Л.М.

ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kleimen@ifz.ru

Обсуждаются геомагнитные возмущения, вызванные межпланетным магнитным облаком, подошедшем к магнитосфере Земли в восстановительную фазу сильной магнитной бури (21-26 июня 2015 г.). На ведущем крае облака наблюдались большие знакопеременные вариации *Bz*- и *By*-компонент ММП. Анализ геомагнитной активности показал, что на земной поверхности наибольшие геомагнитные эффекты отмечались в дневном секторе приполярных широт. Установлено, что знак геомагнитного возмущения контролировался знаком *By*-компоненты ММП и не зависел от знака *Bz* ММП. На основе одновременной магнитной регистрации на 66 ионосферных спутниках связи (проект AMPERE) были исследованы планетарная высокоширотная геомагнитная активность и распределение крупномасштабных продольных электрических токов, вычисленных по магнитным наблюдениям. Обнаружено, что в околополуденном секторе приполярных широт, в случае развития отрицательной магнитной бухты (западный электроджет) втекающие продольные электрические токи наблюдались полярнее вытекающих токов, а в случае положительной бухты (восточной электроджет) вытекающие токи располагались полярнее втекающих.
Можно предположить, что резкая смена знака *By* ММП-привела не только к резкой смене направления ионосферного тока, но и к перемещению его по широте.

ФОРМИРОВАНИЕ СИГНАТУР ИОННЫХ БИМЛЕТОВ В АВРОРАЛЬНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ

Р.А. Ковражкин, А.Л. Глазунов, Г.А. Владимирова

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, rkovrazh@iki.rssi.ru

Мы рассматриваем механизмы формирования авроральных сигнатур ионных бимлетов, которые рождаются в виде кластера пучков в выделенных резонансных зонах токового слоя вдоль хвоста магнитосферы на геоцентрических расстояниях ~30-100 R_E, где R_E – радиус Земли. Бимлеты ускоряются электрическим полем E_y (координата Y направлена по линии утро-вечер поперек хвоста) до ~500-2000 км/с. Результаты анализа ионов по данным спутников ИНТЕРБОЛ-2 и CLUSTER показали, что при распространении бимлетов в авроральной зоне наблюдается структура, названная VDIS, состоящая из нескольких субструктур – сигнатур ионных бимлетов. Энергия ионов в каждой резонансной зоне возрастает с увеличением широты, т.е. максимальная энергия в структуре расположена в наиболее высокоширотной области. Исследование самих сигнатур бимлетов выявило, что картина энергетической дисперсии каждой сигнатуры относительно широты зависит от направления движения спутника по отношению к полярной шапке. При движении спутника по направлению к полярной шапке наблюдается отрицательная, либо нулевая дисперсия, т.е. энергия уменьшается, либо не меняется с увеличением широты. При движении спутника от полярной шапки наблюдается положительная дисперсия, т.е. энергия увеличивается с увеличением широты. На основании рассмотрения таких дисперсионных картин можно исследовать характеристики бимлетов и отождествить физический механизм формирования их авроральных сигнатур. Основное свойство бимлетов – они должны иметь более короткое время жизни по сравнению со временем существования кластера пучков в хвосте; за время жизни кластера бимлеты могут испытывать более быстрые вариации, но при этом оставаться в структуре этого кластера. Был проведен анализ по временам задержек нескольких аппаратов CLUSTER и, действительно, было выявлено, что параметры бимлетов меняются в течение 3-5 мин, а время жизни всей структуры VDIS составляет 10-20 мин. В результате анализа сделан вывод, что при распространении бимлета из пограничного плазменного слоя до авроральных высот на ионы оказывают действие два эффекта: времяпролетный эффект и конвективный дрейф по направлению к Земле. Поэтому при движении спутника к полярной шапке результирующая скорость пучка будет равняться разности скоростей, вносимых этими двумя эффектами. Сигнатуры будут иметь отрицательную дисперсию, так как времяпролетный эффект будет доминирующим. При равенстве скоростей этих эффектов получатся сигнатуры без дисперсии. Экспериментальные результаты показывают, что число таких случаев не превышает 3%, так как такая ситуация наблюдается при очень больших скоростях конвекции, что происходит только при значительных возмущениях магнитосферы. При движении спутника от полярной шапки результирующая скорость пучка будет равняться сумме скоростей, вносимых этими двумя эффектами, поэтому дисперсия сигнатур будет в этих случаях всегда положительной.

ГОДОВАЯ ВАРИАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ В ЧЕТНЫХ - НЕЧЕТНЫХ ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tvkuz3@gmail.com

Межпланетное магнитное поле (ММП B) и электрическое поле (E) солнечного ветра играют ключевую роль при его взаимодействии с магнитосферой. Используется модель взаимодействия E и B полей солнечного ветра с магнитосферой с учетом эффектов годового и суточного движений геомагнитного момента Me и полученные на ее основе эффективные параметры [1]. В нашей модели причинами годовой геомагнитной активности являются как изменения электрического поля солнечного ветра E, так и изменения взаимной ориентации векторов E и геомагнитного момента при годовом движении Земли.

Четные и нечетные циклы солнца являются фазами 22-летнего магнитного цикла. Цель данной работы - найти различия в величинах электро - магнитных параметров солнечного ветра в четных и нечетных солнечных циклах и их отклик в годовой вариации геомагнитной активности. Для вычисления модуля E использовались измерения скорости солнечного ветра V и межпланетного магнитного поля B вблизи орбиты Земли за 44 года в 1964-2008 гг.

Получены годовые вариации параметров солнечного ветра – скорости V и магнитного поля B для четных 20,22 и нечетных 21,23 солнечных циклов, которые имеют ряд отличий в четных и нечетных циклах.

Полугодовая вариация модуля E в четных циклах 20,22, подобная известной вариации геомагнитной активности с максимумами вблизи равноденствий и минимумами вблизи солнцестояний, получена впервые. Показано также, что все величины E больше на фазе роста, чем на фазе спада четных циклов. Полугодовые вариации геомагнитных индексов aa, Kp и Dst для циклов 20,22 имеют известный профиль с максимумами вблизи равноденствий.

Годовая вариация E в циклах 21,23 имеет максимумы зимой, что противоречит известной вариации геомагнитной активности. Показано, что все величины E меньше на фазе роста, чем на фазе спада нечетных циклов. Полугодовые вариации индексов геомагнитной активности для нечетных циклов 21,23 имеют особенности для каждого из индексов, которые обсуждаются. Получена количественная оценка относительной разности Kp в четных и нечетных циклах в годовой вариации.

1. Kuznetsova T.V. and Laptukhov A.I. Contribution of geometry of interaction between interplanetary and terrestrial magnetic fields into global magnetospheric state and geomagnetic activity //Adv. Space Res. 2011. V. 47, P. 978–990.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ФАКТОР В СЕЗОННЫХ ВАРИАЦИЯХ СРЕДНЕСУТОЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ИНДЕКСА Dst

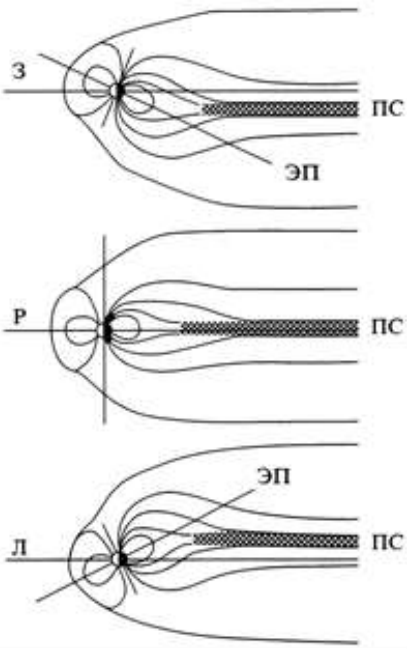
Макаров Г.А.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения РАН,
Якутский научный центр Сибирского отделения РАН, г. Якутск, Россия
gmakarov@ikfia.ysn.ru

Исследование солнечно-земных связей и проявлений космической погоды часто проводится статистическими методами с использованием среднесуточных значений земных, межпланетных и солнечных параметров. Но при суточном усреднении земных параметров разные фазы геомагнитных бурь могут накладываться, параметры бури (фазы, интенсивность, длительность и др.) будут в значительной мере нивелироваться и результаты будут отличаться от результатов, получаемых при обработке отдельно по фазам геомагнитных бурь или относительно какого-либо реперного момента в развитии бури. В связи с этим представляется важным исследовать изменения среднесуточных значений низкоширотного геомагнитного индекса Dst. В настоящей работе рассматриваются сезонные вариации двух характеристик Dst-индекса – частоты появления и величины. Используются данные за период 1966–2015 гг.

Сезонные изменения частоты появления и величины индекса Dst состоят из годовых и полугодовых вариаций.

Показано, что к образованию годовой вариации Dst с минимальными значениями в период зимнего солнцестояния приводит неравномерность сети станций, по данным которых рассчитывается Dst-индекс: три станции из четырех располагаются в Северном полушарии. Если частичный кольцевой ток расположен, подобно плазменному слою, в плоскости, ориентированной по направлению потока солнечной плазмы, то ночная часть магнитосферы, где расположен частичный кольцевой ток, в зимние месяцы будет проецироваться в Северное полушарие (см. рисунок) и низкоширотные станции этого полушария будут регистрировать большую депрессию геомагнитного поля, чем станции Южного полушария.



Схематическое расположение плазменного слоя (ПС) магнитосферы относительно экваториальной плоскости (ЭП) зимой (З), в равноденствия (Р) и летом (Л)

Предложено объяснение возникновения полугодовых вариаций числа дней с отрицательными и положительными среднесуточными значениями индекса Dst и величины Dst. Оно основано на учете перемещения плазменного слоя относительно плоскости геомагнитного экватора при годовом обращении Земли вокруг Солнца, соответствующего изменению вероятности поступления частиц в магнитосферу и последующему изменению интенсивности частичного кольцевого тока. Наибольшая вероятность поступления частиц в магнитосферу имеет место в периоды равноденствий, наименьшая – в периоды солнцестояний.

По данным о полугодовых вариациях числа дней определено критическое среднесуточное значение геомагнитного индекса Dst, начиная с которого день можно считать возмущенным: Dst ≤ –24 нТл.

Работа выполнена в рамках государственного задания по проекту II.16.2.1 (номер госрегистрации № АААА-А17-117021450059-3).

Динамика потоков энергичных электронов внешнего радиационного пояса 14-28 февраля 2014 года

Петров К.А.[2], Калегаев В.В.[1], Власова Н.А.[1], Кугушева А.Д.[2], Назарков И.С.[1]

[1] *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

[2] *Физический факультет Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Исследовались вариации потоков энергичных электронов внешнего радиационного пояса в период продолжительной геомагнитной активности 14 - 28 февраля 2014 г. Сильные вариации параметров межпланетной среды привели к развитию нескольких, последовательно развивавшихся возмущений в магнитосфере. Анализ одновременных наблюдений спутников GOES-15, Electro-L1, приэкваториальных спутников Van Allen Probes и полярного спутника Meteor-M1 позволил дать интерпретацию наблюдавшимся вариациям внешнего радиационного пояса, связанным с потерями частиц.

Исследована роль факторов околоземного пространства (суббуревая активность, волновая активность, вариации солнечного ветра) на динамику потоков электронов для различных возмущений во время рассматриваемого периода. Данные о вариациях потоков высыпающихся частиц на орбите КА Meteor-M1 и питч-угловые распределения потоков энергичных электронов, измеренные КА Van Allen Probes, использовались для оценки роли адиабатических и неадиабатических механизмов в динамике внешнего радиационного пояса.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 19-05-00960.

ПРИМЕНЕНИЕ ЗОНДОВЫХ ПРИБОРОВ ИЭСП-2 И КМ-7 НА СПУТНИКЕ *ИНТЕРБОЛ-2* ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В БЛИЗКОЙ (2-3 R_E) МАГНИТОСФЕРЕ

Н.Ф. Смирнова[1], Г. Станев[2]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nsmirnova@romance.iki.rssi.ru*

[2]*ИКИТ БАН, г. София, Болгария, gstanev@space.bas.bg*

А. Педерсен предложил определять концентрацию окружающей плазмы в магнитосфере на основе измерений потенциала относительно плазмы датчиками электрических полей, установленных на космических аппаратах. Если потенциал спутника положительный относительно потенциала плазмы, то в этом случае баланс токов осуществляется только между электронным током и фототоком. Плотность фотоэлектронного тока используется при оценивании плотности электронов. А. Педерсон предложил эмпирическую модель между плотностью фототока (Jph, $\mu A\text{-}m^{-2}$) и величиной потенциала спутника (Vs,B; Vs>0) [1]. Эту модель можно записать в виде:

$$Jph\ (V)= Jph0[\exp(-Vs/2)+0.0375\exp(-Vs/7.5)],$$

где Jph0 - плотность фототока насыщения. В работе [1] $Jph0=80\ \mu A\text{-}m^{-2}$.

В настоящее время существуют другие подобные модели, в которых плотность фототока насыщения имеет конкретное значение, поэтому проводятся калибровки определенной таким методом концентрации электронов с учетом измерений другими приборами, а также вариаций солнечной активности. При оценивании плотности электронов на спутнике *ИНТЕРБОЛ-2* используется модификация модели А. Педерсена, так как аппаратура позволяет оценить плотность фототока насыщения Jph0 корректно на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 [2]. Это является важным фактом, так как фототок показывает большие вариации в зависимости от материала поверхности зондов и окружающей плазмы вблизи спутников. Фотоэмиссионные свойства магнитосферных космических аппаратов меняются со временем функционирования на орбите, а также с изменением солнечной активности. В результате годичного пребывания *ИНТЕРБОЛ-2* в космосе средняя плотность фотоэлектронного тока на его поверхности выросла приблизительно на 60%. Так как *ИНТЕРБОЛ-2* функционировал в ближней магнитосфере (2-3 R_E), то он имел положительный и отрицательный потенциал: на высотах более 8000 км положительные значения составляли ~75 % , из них ~80% значений в диапазоне 2-5 В. Анализ значений потенциала спутника также возможно сделать на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7.

ИЭСП-2 (измеритель электрических полей) и КМ-7 (датчик электронной температуры) были установлены на спутнике *ИНТЕРБОЛ-2* как отдельные приборы, но в процессе работы с данными выяснилось, что их можно рассматривать как комплекс аппаратуры для измерения параметров плазмы, который позволяет определить концентрацию окружающей плазмы. В докладе представлены основные особенности совместных измерений плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7, а также приводятся примеры определения концентрации электронов в различных геофизических условиях.

Аналоги приборов ИЭСП-2 и КМ-7 следует повторить на других магнитосферных спутниках с апогеем 2-3 R_E.

1. Pedersen A., Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements //*Ann. Geophys.*, V.13, pp.118–121, 1995.
2. Smirnova N.F. and G. Stanev //Geomagnetism and Aeronomy, 2009, V.49, pp. 1204-1207.

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАТРАВОЧНОЙ ПОПУЛЯЦИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА И ИХ УСКОРЕНИЕ ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Н.В. Сотников[1], Е.Е. Антонова[1,2], И.Л. Овчинников[1], М.О. Рязанцева[2]

[1]*НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова*
[2]*Институт Космических Исследований РАН*

sotnikov.nikita@hotmail.com

Вопросы формирования затравочной популяции энергичных электронов (seed population of electrons) и механизм их ускорения до релятивистских энергий, приводящий во время магнитной бури к формированию внешнего радиационного пояса (outer radiation belt - ORB), относится к нерешенным проблемам физики магнитосферы. Известно, что затравочная популяция формируется во время суббуревых инжекций. Однако механизм формирования суббуревых инжекций на низких широтах во время бурь недостаточно исследован. Исследования механизмов ускорения затравочной популяции не привели к однозначным выводам о доминирующей роли одного из механизмов. Так, например, наиболее популярный механизм взаимодействия с хоровыми волнами не смог объяснить характерное время ускорения порядка времени суббури.

Анализируются особенности действия адиабатического и неадиабатического механизмов ускорения во время суббуревых инжекций и формирования затравочной популяции энергичных электронов с учетом локализации действия таких механизмов глубоко внутри магнитосферы во время бури. Учитывался сдвиг аврорального овала на низкие широты во время бури и локализация внешней части радиационного пояса в области проекции аврорального овала на экваториальную плоскость. Показано, что действие адиабатического механизма в результате вариаций крупномасштабного магнитного поля приводит к ускорению электронов затравочной популяции до релятивистских энергий.

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ПЕРИОД 2019-2020 ГГ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЕНУ, КАЗАХСТАН

Тулеков Е.А.[1], Морзабаев А.К.[1], Махмутов В.С.[2], Ерхов В.И.[2], Филиппов М.В.[2]

[1]*Евразийский национальный университет им.Л.Н. Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан,* yerzhan_ta@mail.ru
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия*

Для изучения вариаций потоков вторичных космических лучей, в т.ч. вызванных атмосферными процессами в 2015-2018 гг. на физико-техническом факультете Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан, Республика Казахстан), в содружестве с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН, был создан научный космофизический экспериментальный комплекс, состоящий из детектора CARPET, «Нейтронного детектора» и электростатического флюксметра EFM-100 [1-3].

На предыдущей конференции «Физика плазмы в солнечной системе» были представлены основные характеристики детектора CARPET и экспериментальные данные, полученные за 2016-2020 гг. [2].

В работе приведены результаты анализа данных, полученных на экспериментальном комплексе в период 2019-2020 гг. совместно с электростатическим флюксметром EFM-100, который предназначен для мониторинга атмосферного электрического поля.

Данные наземного комплекса позволяют проводить исследования на долговременную перспективу и могут качественно дополнить общемировую базу данных наряду с данными существующей сети наземных детекторов потоков вторичных космических лучей. Экспериментальные данные комплекса планируется разместить в открытом доступе на сайте университета.

Список литературы

1. M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, O. S. Maksumov, G. A. Bazilevskaya, A. K. Morzabaev, Ye. A. Tulekov. Characteristics of the ground-based « CARPET-ASTANA » instrument for detecting charged component of cosmic rays and preliminary analysis of the first experimental data. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, Vol. 959, 163567. DOI: 10.1016/j.nima.2020.163567
2. E. A. Tulekov, V. S. Makhmutov, G. A. Bazilevskaya, Yu. I. Stozhkov, A. K. Morzabaev, M. V. Philippov, V. I. Erkhov, and A. S. Dyusembekova. Ground-based Instrument for the Study of Cosmic Ray Variation in Nur-Sultan. Geomagnetism and Aeronomy, 2020, Vol. 60, No. 6, pp. 693–698. DOI: 10.1134/S0016793220060134
3. Ye. Tulekov, A. K. Morzabaev, V. S. Makhmutov, V. I. Yerkhov, M. V. Philippov. Variations of cosmic rays in the period 2016-2019 according to observations of the ENU experimental complex. Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. PHYSICS. ASTRONOMY Series, 2020, Vol. 133, №4, pp. 79-95. DOI: 10.32523/2616-6836-2020-133-4-79-85

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛОТНОЙ ВНУТРИМАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С НАТЕКАЮЩИМ ПЛАЗМЕННЫМ ПОТОКОМ

Чибранов А.А., Березуцкий А.Г., Ефимов М.А., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Посух В.Г., Руменских М.А., Трушин П.А., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, chibranov_25@mail.ru

Настоящий эксперимент проводился на базе лабораторной установки КИ-1 (ИЛФ СО РАН) и был ориентирован на изучение взаимодействия натекающего потока плазмы и плотной внутри магнитосферной плазмы. Подобная конфигурация эксперимента ранее не ставилась и является актуальной для изучения.

Внутри вакуумной ($P \approx 3*10^{-6}$ торр) цилиндрической камеры с размерами 5 * 1.2 м помещались полиэтиленовые мишени, которые облучались импульсным лазером для создания потоков плазмы. Первый плазменный поток создавался одновременным облучением двух мишеней и разлетался внутри магнитного поля дипольного типа (с магнитным моментом до 10^6 Гс*см^3), образуя плотную ($n \sim 10^{14}$ см$^{-3}$) внутри магнитосферную плазму. Второй поток плазмы ($n \sim 10^{13}$ см$^{-3}$) налетал на магнитосферу с расстояния 53 см. Его скорость была перпендикулярна магнитному моменту и приблизительно равнялась 100 км/с. Основные измерения проводились с использованием магнитных зондов и зондов Ленгмюра.

Результаты эксперимента демонстрируют, что на первом этапе формируется плазма, захваченная в дипольном магнитном поле. Второй внешний плазменный поток формирует магнитосферу и взаимодействует с внутренней плазмой. При этом величина поджатия дипольного магнитного поля достигает 70 Гс при расстоянии до магнитопаузы $R_d \approx 20$ см. Параметр Холла для данной конфигурации эксперимента D = 2.7.

Данные, полученные в ходе проведения исследований могут быть использованы для более точного теоретического анализа и численного моделирования космофизических процессов, а также могут быть использованы для исследования околоземной космической среды и разработке моделей предсказания космической погоды.

Настоящая работа была выполнена в рамках проекта РНФ № 18-12-00080, при поддержке гранта РФФИ № 18-2921018 и гранта Минобрнауки 075-15-2020-780.

ПОТОКИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ 7-10 СЕНТЯБРЯ 2017 Г. ПО ДАННЫМ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

Т.А. Яхнина, А.Г. Яхнин

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, tyahnina@gmail.com

Рассмотрена динамика потоков релятивистских (E > 1 МэВ) электронов по данным низкоорбитальных спутников NOAA POES и MetOp во время магнитосферного возмущения 7-10 сентября 2017 г. Возмущение состояло из двух интенсивных бурь. Главная фаза первой бури началась около 23 UT 7 сентября, и минимальное значение SYM-H = -146 нТл было отмечено в ~ 01:10 UT 8 сентября. Вторая буря началась 8 сентября около 12 UT, а минимальное значение SYM-H = -115 нТл имело место в ~13:30 UT. В течение 7 сентября, до начала первой бури, наблюдалось плавное уменьшение потоков захваченных (вне конуса потерь) релятивистских электронов (РЭ), связанных с предшествующей возмущенностью. Во время главной фазы первой бури произошло резкое уменьшение потока захваченных РЭ, синхронно наблюдавшееся низкоорбитальными спутниками в разных секторах MLT. После ~3 UT 8 сентября потоки захваченных РЭ стали расти, и этот рост продолжался до ~6 UT 9 сентября. На фоне этого роста также произошло некоторое уменьшение потоков РЭ во время главной фазы второй бури, хотя и не такое заметное, как в первом случае. Поведение захваченной компоненты на малых высотах отличалось от динамики потоков РЭ в магнитосфере, где, по данным геостационарных спутников, «провал» в потоках РЭ во время второй главной фазы был существенно больше. Это может означать, что механизмы «провалов» в потоках электронов на главных фазах этих бурь различны. Действительно, рассмотрение потоков высыпающихся (внутри конуса потерь) частиц, которые также измерялись на низкоорбитальных спутниках, показывает, что во время первой бури высыпаний РЭ практически не было. В этом случае «провал» в потоках захваченных частиц мог быть связан с потерями на магнитопаузе. Основные высыпания РЭ наблюдались во время главной фазы второй бури и в начале ее фазы восстановления. Возможно, что именно высыпания были причиной «провала» в потоках захваченных электронов во второй буре.

Потоки высыпающихся РЭ разделены на группы согласно классификации [1, 2], которая предполагает различные механизмы высыпаний. Наблюдения высыпаний сопоставлены с положением плазмопаузы, определенной по данным моделирования методом пробных частиц [3]. В целом, распределение высыпаний РЭ разных групп по MLT и их положение относительно плазмосферы согласуется со статистическими характеристиками, полученными в [1, 2]. Имеющиеся, тем не менее, различия могут быть связаны с сильными деформациями плазмосферы во время интенсивных возмущений.

1. Yahnin, A. G., T. A. Yahnina, N. V. Semenova, B. B. Gvozdevsky, and A. B. Pashin (2016), Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES, J. Geophys. Res. Space Physics, 121, 8286–8299, doi:10.1002/2016JA022765.
2. Yahnin, A. G., T. A. Yahnina, T. Raita, and J. Manninen (2017), Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation, J. Geophys. Res. Space Physics, 122, 9169–9182, doi:10.1002/2017JA024249.
3. Goldstein, J., S. De Pascuale, C. Kletzing, W. Kurth, K. J. Genestreti, R. M. Skoug, B. A. Larsen, L. M. Kistler, C. Mouikis, H. Spence (2014), Simulation of Van Allen Probes plasmapause encounters, *J. Geophys. Res., 119*, 7464, doi:10.1002/2014JA020252.

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МАКСИМУМА СЛОЯ F2 В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ НИЗКОЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, krash@izmiran.ru

Наиболее распространенный источник данных о состоянии ионосферы - классический метод вертикального радиозондирования ионосферы имеет особенности в структуре ионограмм ВЗ в условиях низкой солнечной активности, в частности, в околополуденное время в весеннее-летний период, особенно при наличии геомагнитной возмущенности, наблюдается слабая выраженность следа отражения от слоя F2. Как правило, при этом следы моды 1F1 хорошо сформированы и, как следствие, автоматизированные программы обработки ионограмм зачастую принимают их за треки отражения от слоя F2, что приводит к значительной погрешности в оценке параметров главного ионосферного максимума. Исследование проводилось на основе данных регулярных обсерваторских наблюдений в ИЗМИРАН двумя ионозондами: “Парус-А”, на котором наряду с автоматической системой AUTOSCALA [1] (комплекс Парус-Autoscala) производится ручная операторская обработка часовых данных, и DPS-4 с системой ARTIST 5 - комплекс DPS-Artist [2].

В данной работе представлены результаты анализа особенностей в задаче оценки параметров максимума слоя F2 [*foF2,hmF2*] ионосферы двумя комплексами автоматического масштабирования и операторской обработкой ионограмм ВЗ, рассматриваемой как эталон, для 2018 г. – года низкой солнечной активности. На рис. 1 приведены распределения параметров *foF2* и *hmF2* для летнего (июль) сезона, полученные комплексом DPS-Artist, и можно видеть характерные особенности в виде локального пика для аргумента -0,5 МГц (левая панель) и сильно несимметричное и смещенное поведение высоты максимума слоя F2 (правая панель). Отмечается общее систематическое значительное занижение *hmF2* в результатах работы автоматических систем обработки ионограмм, существенно более значительное для комплекса DPS-Artist, максимальное в околополуденное время, со средним значением для данного месяца ~ -24 км.

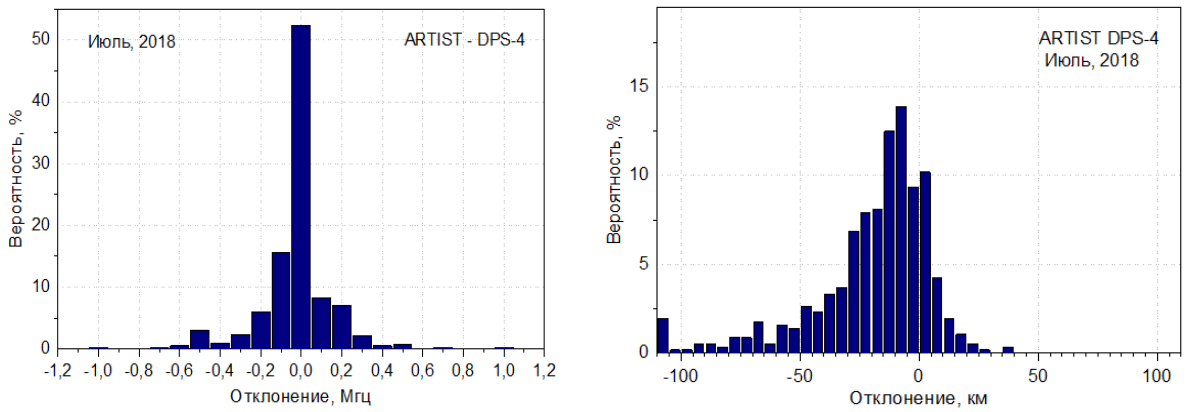


Рис. 1. Распределение отклонений плазменной частоты и высоты максимума слоя F2, полученных в автоматизированной системе DPS-Artist по отношению к операторской обработке ионограмм ВЗ ионозонда ”Парус-А” для летнего сезона 2018 г.

1. Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde // Computer & Geosciences. V 36. P. 628-635. 2010.
2. Galkin I.A., Khmyrov G.M., Kozlov A.V., Reinisch B.W., Huang X. and Paznukhov V.V. The ARTIST 5, // Radio Sounding and Plasma Physics, AIP Proceedings. # 974. 2008.

МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ Е-СЛОЯ ДЛЯ АВРОРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ

Деминов М.Г.

ИЗМИРАН, Москва, г. Троицк, Россия, deminov@izmiran.ru

Представлены первые результаты создания приближенной модели критической частоты Е-слоя foE для авроральной области без ограничений по интервалам местного времени, сезонам, уровням солнечной и геомагнитной активности. В модели учтены солнечный и авроральный источники ионизации атмосферы через простую зависимость

$(foE)^4 = (foE_{sol})^4 + C\,(foE_{avr})^4$,

где с помощью коэффициента C косвенно учтена зависимость эффективности высыпаний авроральных электронов от условий освещенности ионосферы.

Частота foE_{sol} не зависит от геомагнитной активности. Индикатором солнечной активности для нее является индекс $F = (F_1 + F_{81})/2$, где F_1 и F_{81} – величина потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10.7 см в данный день и среднее за 81 день значение этого потока, центрированное на этот день.

Частота foE_{avr} не зависит от индекса солнечной активности. Эта частота существенна для авроральной области, которая определена полюсными и экваториальными границами аврорального овала и диффузных высыпаний электронов. Локализации этих границ зависят от местного времени и уровня геомагнитной активности. Экваториальная граница диффузных высыпаний электронов согласована с локализацией главного ионосферного провала по модели [1]. В модели [1] локализация главного ионосферного провала зависит от средневзвешенного (с характерным временем 6 часов) индекса геомагнитной активности, что отражает зависимость этой локализации от предыстории изменения геомагнитной активности. В модели принято, что локализации всех перечисленных границ и самой величины foE_{avr} зависят от такого средневзвешенного индекса геомагнитной активности. Это означает, что модель воспроизводит только основные тенденции изменения критической частоты Е-слоя в авроральной области в периоды высокой геомагнитной активности. Модель foE_{avr} является аналитической моделью. В этом еще одна особенность создаваемой модели foE. Даны предварительные оценки точности такой модели.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-05-00050 и при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-72-10023.

1. Deminov M.G., Shubin V.N. // Geomagn. Aeron. 2018. V. 58. P. 348–355.

РАДИОЗАТМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОГО ШТОРМА В ИЮНЕ 2015 ГОДА

Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А., Губенко Д.В

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, vngubenko@gmail.com

За последние два десятилетия спутниковые методы дистанционного зондирования превратились в универсальный и мощный инструмент для системных исследований Земли в различных пространственно-временных масштабах с практическими приложениями, выполняемыми в реальном времени. Крупные региональные и глобальные наземные сети ГНСС (глобальных навигационных спутниковых систем) и многочисленные космические приемники обеспечивают уникальные данные о нейтральной атмосфере и ионосфере, а также наблюдения за поверхностью Земли. Основой дистанционного зондирования с помощью глобальных навигационных спутниковых систем являются методы зондирования нейтральной атмосферы и ионосферы, которые были разработаны для наблюдения Земли и решения многочисленных прикладных задач. Базовый принцип здесь состоит в определении параметров нейтральной атмосферы и ионосферы (коэффициент преломления, давление, геопотенциальная высота, температура, содержание водяного пара, электронная плотность) на основе наблюдения спутниковых сигналов, распространяющихся в атмосфере и ионосфере Земли. Ключевыми свойствами радиозатменных методов зондирования являются долговременная стабильность, всепогодность, высокая точность и экономичность измерений.

Летом 2015 года на Солнце имели место корональные выбросы массы в сторону Земли. Данное событие было зафиксировано многими космическими аппаратами и ионосферными станциями. Корональные выбросы плазмы, дошедшие до Земли в период с 22 по 23 июня 2015 года, спровоцировали магнитную бурю класса G4 (значение Kp-индекса равно 8), вызвавшую значительные ионосферные возмущения параметров радиосигналов на трассах зондирования навигационные спутники GPS – низкоорбитальные спутники COSMIC. Мощные рентгеновские вспышки, наблюдавшиеся на Солнце в период геомагнитного шторма, также обусловливали возмущения волновых характеристик во время радиозатменных измерений в ионосфере Земли.

Нами проведены обработка и анализ ~100 сеансов радиозатменных измерений FORMOSAT-3/COSMIC, проведенных во время геомагнитной бури 22–23 июня 2015 года в высокоширотной ионосфере Земли. Показано, что ионосферные возмущения характеристик радиоволн обусловлены как геомагнитными условиями во время шторма, так и активностью мощных рентгеновских вспышек, наблюдавшихся в период измерений. Осуществлен поиск поглощения дециметровых радиоволн (длина волны ~19 см) на несущей GPS-частоте 1545.42 МГц. По результатам анализа данных FORMOSAT-3/COSMIC, впервые обнаружено поглощение радиоволн дециметрового диапазона в D- и E-областях высокоширотной ионосферы Земли. Установлено, что абсолютная величина интегрального поглощения на трассах радиозатменного зондирования составляет ~3 дБ в интервале высот ~60–90 км, а в некоторых случаях достигает ~10 дБ на уровнях от ~90 до 95 км. Практическая значимость изучения эффектов поглощения радиоволн в D- и E-областях ионосферы связана с обеспечением бесперебойной работы систем космической радиосвязи и навигации.

Работа выполнена в рамках государственного задания и поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А).

О ПРЕДЕЛАХ ПРИМЕНИМОСТИ ПРИБЛИЖЕНИЯ МАГНИТНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН КНЧ ДИАПАЗОНА В ИОНОСФЕРЕ

Орлова Е.В., Котик Д.С., Яшнов В.А.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, ekaterina.orlova.94@bk.ru

Традиционно при описании КНЧ и более низкочастотных волновых процессов в ионосфере и магнитосфере Земли используется приближение магнитной гидродинамики (МГД). Начиная с первых публикаций о свойствах ионосферного МГД волновода [1] распространение и генерация волн указанного диапазона в ионосферной плазме трактуется в терминах альвеновской и быстрой магнитозвуковой (БМЗ) волн [2-4].

В работе проведены расчёты характеристик электромагнитных волн КНЧ диапазона (показателей преломления, поляризации, величины и направления групповой скорости и др.) в ионосфере с целью выбора оптимальных условий их возбуждения искусственными ионосферными источниками, возникающими при воздействии на ионосферу мощных наземных радиопередатчиков. Расчёты выполнены с использованием электродинамического подхода на основе модели многокомпонентной ионосферной плазмы, разработанной с учётом соударений электронов и ионов между собой, а также с нейтральными частицами. Распределение заряженных и нейтральных частиц в ионосфере вычислялось в рамках моделей ионосферы IRI-2016 и атмосферы NRLMSISE-00. Для вычисления гирочастот электронов и ионов использовалась модель геомагнитного поля IGRF-12.

Получены высотные зависимости показателей преломления и поляризации обыкновенной и необыкновенной волн, зависимости показателей преломления от угла между направлением распространения (волновым вектором) и геомагнитным полем, зависимости направления вектора групповой скорости от направления волнового вектора. Расчёты выполнены для среднеширотной и высокоширотной ионосферы и для разного времени суток. Проведено сопоставление полученных зависимостей с аналогичными зависимостями, рассчитанными с использованием МГД приближения. По результатам расчётов определены области применимости МГД приближения.

Определены условия, при которых для описания характеристик БМЗ волн в области E ионосферы справедливо свистовое приближение.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-42-520035. Модель показателя преломления КНЧ нормальных волн в многокомпонентной магнитоактивной ионосферной плазме разработана при поддержке гранта РНФ № 20-17-00050.

1. Greifinger C., Greifinger S. // J. Geophys. Res. 1968. V. 76. P. 7473.
2. Polyakov S.V., Rapoprt V.O. // Geomagn. Aeron. 1981. V. 21. P. 610.
3. Lysak, R. L., Waters C. L., Sciffer M. D. // J. Geophys. Res. Space Physics. 2013. V. 118. P. 1514.
4. Ermakova E. N., Polyakov S. V., D. S. Kotik D. S. // Radiophys. Quantum Electron. 2010. V. 53. P. 557.

ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПУЗЫРИ: ЗАВИСИМОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ НАБЛЮДЕНИЯ ОТ МЕСТНОГО ВРЕМЕНИ

Сидорова Л.Н.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, lsid@izmiran.ru

Исследован характер изменчивости гистограмм LT-распределений вероятности наблюдения экваториальных плазменных пузырей с ростом высоты регистрации. Рассматривались условия повышенной и максимальной солнечной активности, когда процессы генерации плазменных пузырей наиболее активны. Для этого проведен детальный сравнительный анализ гистограмм LT-распределений вероятности наблюдения плазменных пузырей, построенных по данным спутников ISS-b (~972−1220 км), Hinotori (~650 км), ROCSAT-1 (~600 км), AE-E (~300–475 км) и CHAMP (~380–450 км) на разных орбитальных высотах.

Выявлено, что с ростом высоты наблюдения имеется заметная тенденция сдвига максимума вероятности наблюдения пузырей по времени. Так, если на высотах основания *F*-области максимум приходится на послезаходные (~20:30–22:00 LT) часы, то по мере роста высоты наблюдения он смещается к предполуночным (~21:00–24:00 LT, ~600 км), далее к послеполуночным (~01:00–03:00 LT, ~650 км) и, наконец, к предрассветным (~03:00–04:00 LT, ~972−1220 км) часам. Выявлено, что наиболее типичные скорости подъема экваториальных плазменных пузырей составляют ~150–300 м/с. Эти значения скорости соответствуют многочисленным наблюдательным данным.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ NORSAT-1 И SWARM

Синевич А.А., Чернышов А.А., Чугунин Д.В., Могилевский М.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, sinevich.aa@gmail.com

Поляризационный джет - узкая струя быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах верхней области ионосферы F-слоя, возникающая во время повышенной геомагнитной активности. Механизм формирования поляризационного джета, а также структура мелкомасштабных неоднородностей параметров ионосферы внутри него являются открытыми вопросами. В данной работе проведено подробное исследование мелкомасштабной структуры поляризационного джета в субавроральной области во время геомагнитной бури. Представлены результаты измерений параметров плазмы внутри поляризационного джета с помощью зондов Ленгмюра, установленных на спутнике NorSat-1. Показано наличие неоднородностей температуры и плотности плазмы внутри поляризационного джета с пространственными размерами десятки — сотни метров. Подтверждены известные ранее особенности развития поляризационного джета, а также обнаружено, что в рассмотренном случае с развитием геомагнитной активности распределение температуры электронов внутри джета разделяется на два ярко выраженных пика. Также в настоящем исследовании для более полного анализа свойств и динамики поляризационного джета во время геомагнитного возмущения использовались данные спутников Swarm.

МОРФОЛОГИЯ И МЕХАНИЗМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ЭФФЕКТОВ ПОСЛЕДЕЙСТВИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Клименко М.В. 1, Клименко В.В. 1, Ратовский К.Г. 2, Ясюкевич А.С. 2, Ясюкевич Ю.В. 2, Бессараб Ф.С. 1

1 КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия, mvklimenko@wdizmiran.ru

2 ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

Морфология ионосферных возмущений в периоды геомагнитных бурь и механизмы их формирования являются наиболее важными и сложными вопросами физики ионосферы. В последние годы для решения этих вопросов все чаще используются вместе экспериментальные данные и результаты теоретических моделей верхней атмосферы Земли. В этом докладе мы представляем краткий обзор модельных и статистических исследований, выполненных совместно в КФ ИЗМИРАН и ИСЗФ СО РАН, отклика верхней атмосферы на геомагнитные бури. Одним из интересных явлений выявленных нами было формирование послебуревых положительных возмущений электронной концентрации в F области ионосферы. Используя глобальную самосогласованную модель термосферы, ионосферы и протоносферы (ГСМ ТИП), мы рассмотрели основные физические процессы, которые играют важную роль в формировании эффектов последействия. В частности, результаты модели показывают увеличение значений отношения n(O)/n(N2) после бури в основном за счет увеличения n(O), что приводит к дневным положительным эффектам последействия в NmF2 и полном электронном содержании. Результаты статистических исследований по данным наземных наблюдений ГНСС приемников и ионозондов указывают на то, что ионосферные эффекты последействия геомагнитных бурь действительно существуют и по-разному проявляют себя в электронной концентрации в F области и в полном электронном содержании. Показано, что ионосферные эффекты последействия зависят от сезона и от интенсивности геомагнитной бури.

Это исследование было проведено при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (№ 18-05-00594).

Тестирование модели IRI на данных измерения электронной концентрации ионосферы спутниками SWARM в 2014 г.

Юргайтис Д.Ю.
Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
d.yurgaytis@gmail.com

Ключевые слова: *ионосфера, модели ионосферы, электронная концентрация*

В ходе работы проведено сравнение электронной концентрации, наблюдаемой in-situ контактным способом на спутниках ESA (European Space Agency) SWARM и соответствующих им результатов расчетов по современной эмпирической модели IRI-2016 в различных геомагнитных условиях (слабо возмущенных и сильно возмущенных) периода максимума солнечной активности 2014 г. для разных широт - проведенные исследования позволили судить об особенностях работы модели в различных гео– и гелиофизических условиях для разных широт в фазе максимума 24–го цикла солнечной активности.

Выполненный в работе анализ показывает рост систематической ошибки модели для возмущенных геомагнитных условий почти в 1,5 раза относительно спокойных. Дополнительные исследования показали зависимость систематической ошибки от широты. Таким образом, получено, что модель IRI не очень хорошо описывает экваториальную аномалию и область высоких широт. Так, для средних широт возрастание ошибки в возмущенных условиях составляет более 1.5 раз, для области высоких широт эта величина составляет 1.3 раза, а для экваториальных - в 1.65 раза для данных 2014г. Одновременно, модель IRI-2016 описывает поведение электронной концентрации в средних широтах в невозмущенных условиях 2014г. со средней годовой ошибкой 27%. Это можно считать удовлетворительным для ряда приложений.

Проведен детальный анализ статистики выделенного в экспериментальных данных шума (вариации электронной концентрации Ne относительно сглаженного регулярного уровня). Наблюдается изменение дисперсии шума на различных широтах, что также отражается в росте ошибки в случаях возмущенных гео- гелиофизических условий. Установлено отсутствие значимой корреляции между величиной дисперсии шума измерений электронной концентрации и магнитными геофизическими индексами Dst и AE. В тоже время, наши исследования показывают наличие значимой корреляции вариаций (дисперсии) электронной концентрации с планетарным индексом Kp.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИНДЕКСОВ ИОНОСФЕРНЫХ МЕРЦАНИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЧАСТОТЫ РЕГИСТРАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ И ТИПА ПРИЕМНИКА СИГНАЛОВ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

Демьянов В.В.[1], Ясюкевич Ю.В.[1], Sergeeva M.A.[2], Данильчук Е.И.[3]

[1]*Институт Солнечно-Земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия, sword1971@yandex.ru*
[2]*CONACyT, SCiESMEX, LANCE, Instituto de Geofisica, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico, maria.a.sergeeva@gmail.com*
[3]*Иркутский Государственный Университет, Иркутск, Россия, danilchuk.k@mail.ru*

С момента начала эпохи среднеорбитальных спутниковых радионавигационных систем (СРНС) GPS (NAVSTAR) и ГЛОНАСС в 80-90-х годах прошлого века, сигналы навигационных спутников широко и весьма успешно используются, не только для решения навигационных, но и научно-исследовательских задач. Одной из научных задач в рамках исследований верхней атмосферы Земли является наблюдение тонкой структуры ионосферы по характеристикам мерцаний амплитуды и фазы навигационных сигналов. Для измерения этих характеристик широко используются такие индексы мерцаний, как *S4*, *σφ*, *ROTI* и *DROTI* [1]. Эффективность указанных индексов в значительной степени зависит от частоты регистрации измерений амплитуды и фазы сигнала, а также от процедуры предварительной фильтрации и удаления тренда этих измерений [2]. Характеристики радиотракта приемника сигналов навигационных спутников значительно влияют на чувствительность измерений, и, как результат, на правильность интерпретации результатов. Архитектура и параметры настройки следящих измерителей радионавигационных параметров также оказывают влияние на чувствительность измерений.

Отдельный важный вопрос состоит в том, какая частота регистрации первичных измерений не является избыточной для того, чтобы обнаружить слабое ионосферное возмущение, но исключить неинформативный шум измерений. Это отдельное поле для исследований качества измерений параметров трансионосферных сигналов с частотой регистрации выше 10 Гц [3]. Часто такие измерения рассматриваются, как неинформативный шум, однако не всегда это соответствует действительности. Рассматривая данные с большей частотой регистрации можно надеяться на обнаружение слабых мелкомасштабных возмущений коэффициента преломления и, следовательно, повысить чувствительность систем ионосферного радиомониторинга.

Анализ данных трансионосферного радиозондирования с большой частотой регистрации требует разработки новых индексов ионосферных мерцаний, которые позволяют производить прямые измерения с минимальным использованием дополнительных процедур предварительной обработки первичных данных и ясной зависимостью индекса от особенностей построения и настройки приемника навигационных сигналов СРНС.

В настоящем докладе представлен анализ поведения и чувствительности стандартных индексов ионосферных мерцаний при обработке измерений с частотой регистрации 50 Гц при использовании навигационных приемников типов JAVAD, TRIMBLE, SEPTENTRIO и LEICA [4]. Кроме этого предлагается и анализируется новый индекс ионосферных мерцаний – вторая производная фазы навигационного сигнала, предназначенный для обработки данных с высокой частотой регистрации [5].

Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ № 17-77-20005.

1. Bhattacharrya A. Nighttime equatorial ionosphere: GPS scintillations and differential carrier phase fluctuations. *Radio Sci.*, 2000, *35(1),* 209-224;

АНАЛИЗ ШУМОВ ОЦЕНКИ GNSS TEC С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ.

Падохин А.М., Мыльникова А.А., Морозов Ю.В., Ясюкевич Ю.В.

МГУ им М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, padokhin@physics.msu.ru

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, yasukevich@iszf.irk.ru

JAVAD R&D, г. Москва, Россия, y.morozov@javad.com

Знание ионосферной изменчивости на различных пространственно-временных масштабах важно для надёжного функционирования радиотехнических систем, использующих в своей работе трансионосферный радиоканал. Одной из наиболее часто рассматриваемых характеристик в этой связи является полное электронное содержание (TEC), которое можно оценить с помощью радиопросвечивания ионосферы сигналами глобальных спутниковых навигационных систем (GNSS). Оценки TEC, в свою очередь, являются исходными данными для более продвинутых методов исследования ионосферы, включая радиотомографические и радиоинтерферометрические. Это накладывает высокие требования к шумам в оценках TEC. До недавнего времени для оценки вариаций TEC по данным GNSS в основном использовалась комбинация фазовых измерений на паре когерентных рабочих частот. Такая комбинация обладает на порядок меньшим уровнем шума по сравнению с комбинацией, построенной на данных групповых задержек, за счёт большего уровня шума в измерениях псевдодальностей. По аналогичным причинам из-за высокого уровня шума ранее практически не использовалась одночастотная фазово-кодовая комбинация для оценки TEC.

Уменьшить уровень шума в данных псевдодальностей возможно переходя к новым типам модуляции навигационных сигналов, например AltBOC. Такие сигналы за счёт большей ширины спектрального диапазона имеют меньшую ширину автокорреляционной функции сигнала, что позволяет уменьшить влияние многолучевости и уменьшить шумы в оценках псевдодальности, что в свою очередь должно привести к уменьшению шумов в оценке TEC. Примером сигнала, использующего AltBOC модуляцию является сигнал Galileo E5. В настоящей работе приводятся результаты сопоставления уровня шумов в оценке TEC на основе двухчастотной фазовой комбинации и одночастотной фазово-кодовой комбинации для традиционных навигационных сигналов, использующих BPSK и BOC модуляции, и новых навигационных сигналов, использующих AltBOC модуляцию. Для анализа используются данные с приёмника JAVAD TRE3, способного принимать сигналы Galileo E5 и расположенного на крыше физического факультета МГУ за период сентябрь-октябрь 2020г. В качестве оценки шума используется СКО TEC в окне 100 сек. При частоте сбора данных 1Гц. Показано, что средний уровень шума для одночастотной фазово-кодовой комбинации оценки TEC с использованием сигнала Galileo E5 составляет 0.05TECU для углов возвышения (30-60°), что лишь немногим больше соответствующего уровня шума для двухчастотной фазовой комбинации (0.04TECU). Таким образом наши результаты показывают, что прием сигналов Galileo E5 впервые позволяет использовать одночастотные фазово-кодовые комбинации наравне с традиционно используемыми двухчастотными фазовыми для исследования ионосферного отклика на различные гелигеофизические возмущения. Вместе с тем следует отметить возрастающую техническую сложность приёмника, обеспечивающего возможность работы с ультра широкополосными сигналами (ширина диапазона ~51.15МГц для AltBOC и 20.46МГц для BPSK).

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-05-00941.

ОТКЛИК ИОНОСФЕРЫ НА ЗАПУСК FALCON HEAVY ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ПРИЁМНИКОВ ГНСС

Клюсилов А.В., Ишин А.Б.

ФГБОУ ВО ИРНИТУ, г. Иркутск, Россия, aklyusilov@mail.ru

В настоящее время большую роль в науке и практике играют измерения с помощью глобальных навигационных спутниковых систем (далее – ГНСС). ГНСС являются одним из важнейших инструментов изучения ионосферы.

В качестве эксперимента был выбран первый испытательный запуск ракеты-носителя сверхтяжёлого класса Falcon Heavy, который состоялся 6 февраля 2018 года. Анализу были подвергнуты данные мировой сети станций ГНСС (GPS и ГЛОНАСС). Они были обработаны для получения вариаций ПЭС по двухчастотным фазовым измерениям [1]. В результате были получены ряды ПЭС. Указанные ряды фильтровались в диапазоне периодов 2:10. После этого были построены карты вариаций ПЭС. По картам можно проследить, что после запуска в северо-западном секторе наблюдались возмущения. Указанные возмущения представляли собой отрицательные вариации ПЭС амплитудой 0.5 TECU ПЭС. Длительность возмущения составила 29 минут. Анизотропия возмущений предположительно связана с направлением линий магнитного поля и взаимным расположением магнитного поля, фронта ударной акустической волны и траектории движения ракеты-носителя. Подобная анизотропия наблюдалась при запусках ракет Falcon 9 [2]. В дальнейшем предполагается провести проверку гипотезы о влиянии направления магнитного поля на наблюдаемую анизотропию возмущения.

1. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН. 2006. 480 с.
2. Chou, M.-Y., Shen, M.-H., Lin, C. C. H., Yue, J., Chen, C.-H., Liu, J.-Y., & Lin, J.-T. (2018). Gigantic circular shock acoustic waves in the ionosphere triggered by the launch of FORMOSAT-5 satellite. Space Weather, 16, 172–184. https://doi. org/10.1002/2017SW001738 .

О ЗАВИСИМОСТИ МОДИФИКАЦИИ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ИОНОСФЕРЕ ОТ БЛИЗОСТИ ЧАСТОТЫ ВОЛНЫ НАКАЧКИ К 4-Й ЭЛЕКТРОННОЙ ГИРОГАРМОНИКЕ

С.М. Грач, Е.Н. Сергеев, А.В. Шиндин

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, sgrach@rf.unn.ru

Исследования модификации профиля электронной концентрации $N(z)$ (z – высота) в ионосфере в нагревных экспериментах с помощью доплеровского зондирования на нескольких фиксированных частотах проводились с середины 80-х годов XX века на стендах СУРА и EISCAT [1]. С развитием цифровой радиоприемной аппаратуры была разработана новая методика широкополосного зондирования возмущенной области ионосферы в области плазменных резонансов фазовым методом с высоким частотным и временным разрешением [2]. В 2014 г. по данной методике был проведен эксперимент на стенде HAARP (Аляска, США), результаты анализа одного из сеансов воздействия приведены в [3]. В эксперименте измерялась фаза φ_i и амплитуда A_i спектральных компонент f_i отраженных от ионосферы широкополосных импульсных сигналов. Путем решения обратной задачи [2,3] осуществлялся переход от $\varphi_i\,(f_i, t)$ (t – время после включения волны накачки, ВН) к вариациям высоты отражения z_{Ri} соответствующей i-той спектральной компоненты. Измерения A_i давали возможность оценивать аномальное ослабление (АО) пробных волн. Одновременные измерения искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) позволяли устанавливать соответствие высоты энерговклада волны накачки (ВН), различным спектральным компонентам ИРИ, а также соотношение частоты ВН f_0 и четвертой электронной гирогармоники $4f_c$. Эксперименты проводились для частот ВН – 170 кГц $\lesssim f_0 - 4f_c \lesssim$ +80 кГц, основной целью было установление зависимости вариаций электронной концентрации $\Delta N(t,z) = N(t,z) - N(t_0,z)$ от $f_0 - 4f_c$.

Обнаружено, что в первые 1-5 с после включения ВН наблюдается выдавливание плазмы из области отражения ВН, причем величина и динамика $\Delta N(t,z)$ слабо зависят от $f_0 - 4f_c$. Далее, через 2-3 с, при $f_0 < 4f_c$ еще более заметное выдавливание начинается из области верхнегибридного резонанса (ВГР) ВН . Этот процесс сопровождается развитием сильного (до 20 дБ) АО и замедлением (в некоторых сеансах – уменьшением) выдавливания из области отражения ВН. Такое поведение говорит о том, что процессы в области ВГР экранируют (хотя бы частично) поступление энергии ВН к ее точке отражения. Однако с дальнейшим течением времени вытеснение из области отражения снова усиливается и в ряде сеансов сравнивается с $\Delta N(t, z_{\text{ВГР}})$. Отметим, что при $t > 15$ с наблюдалось слабое (заметно меньшее, чем в областях отражения и ВГР) уменьшение электронной концентрации во всем интервале высот от ВГР до отражения. В единственном сеансе при $f_0 > 4f_c$ ($f_0 - 4f_c \sim$80 кГц), выдавливание из области ВГР ВН начиналось позднее, ≈ через 10 с после включения ВН. Экранировки области отражения не наблюдалось, а при $t > 15$ с имело место практически одновременное выдавливание плазмы из двух областей – области отражения и области ВГР. При $f_0 \approx 4f_c$ (точнее, при $f_0 - 4f_c \sim 10 - 20$ кГц) выдавливание плазмы из области ВГР было заметно слабее и развивалось заметно медленнее, чем при частотах далеких от циклотронного резонанса, хотя сопровождалось сильным АО.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ 20-12-00197 и РФФИ 20-32-70198

1. В.В. Васьков и др. Письма в ЖЭТФ, 1986, 43, №11, 512-515.
2. Shindin A., Sergeev E., Grach S. //Radio Science, 2012, 47, RS0N04, doi:10.1029/2011RS004895.
3. Sergeev, E. N., et al. /Radio Sci.2016, 51,1118–1130, doi:10.1002/2015RS005936.

ДАКТЫ ПОВЫШЕННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СТЕНДА EISCAT/HEATING

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С.

ААНИИ Росгидромет, г. Санкт Петербург, Россия, nataly@aari.nw.ru

По данным многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating в г. Тромсе, северная Норвегия (69.6ºN, 19.2ºE), детально исследованы условия генерации, характеристики и пороги возбуждения дактов повышенной электронной плотности *N*e в высокоширотной верхней (F-область) ионосфере. Мощная КВ радиоволна необыкновенной (X-мода) поляризации излучалась в магнитный зенит на частотах в диапазоне f_H = 6.2 - 8 МГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза (или 5 мин нагрев, 2.5 мин пауза). Для излучения использовалась фазированная антенная решетка с шириной диаграммы направленности порядка 5 - 7 градусов, обеспечивающая эффективную мощность излучения *P*эфф = 560 - 850 МВт. В период экспериментов частота нагрева f_H была как ниже, так и выше критической частоты *foF*2. Характеристики дактов повышенных значений *N*e определялись по данным измерений EISCAT радара некогерентного рассеяния (НР) радиоволн (931 МГц), пространственно совмещенного с нагревным стендом.

Установлено, что возрастания *N*e начинались с высот, превышающих высоту отражения X-волны накачки на 10 - 30 км, и регистрировались вплоть до верхней высотной границы измерений радара НР. Максимальные повышения *N*e (в 1.5 - 2 раза по сравнению с фоновыми значениями *N*e) наблюдались в направлении магнитного поля Земли в диапазоне высот от 300 до 500 км. Ширина дакта составляла порядка 3 градусов. Обнаружено, что *N*e начинали возрастать уже в первом 5 с шаге измерений радара НР и достигали насыщения через 30 - 50 с после включения нагревного стенда. Времена релаксации *N*e после окончания цикла нагрева до фоновых значений могли достигать нескольких минут.

Предполагается, что магнитно-ориентированные возрастания *N*e при X-нагреве высокоширотной *F*-области ионосферы вызваны генерацией потока ускоренных электронов вдоль направления магнитного поля Земли. Рассмотрены возможные механизмы их генерации. По данным экспериментов при ступенчатом изменении эффективной мощности излучения нагревного стенда пороги возбуждения дактов повышенной электронной плотности (без учета поглощения X-волны в нижней ионосфере) составляют E_{Ne} (X) = 0.26 В/м, что существенно ниже порогов возбуждения ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности, существующей в течение всего цикла нагрева.

ЗАВИСИМОСТЬ ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ОТ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЛНЫ НАКАЧКИ СТЕНДА EISCAT/HEATING С УЧЕТОМ ПОГЛОЩЕНИЯ В НИЖЕЛЕЖАЩИХ СЛОЯХ

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С.

ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, borisova@aari.ru

Представлены результаты исследований минимальных значений электрического поля волны накачки в ионосфере $E_{ион}$, необходимого для генерации ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности в F-области высокоширотной ионосферы. Эксперименты по модификации ионосферы проводились с использованием нагревного комплекса EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия). Рассмотрены данные экспериментов 2012-2015г.г., когда мощная КВ радиоволна X-поляризации излучалась на высоких частотах нагрева f_H (7.1 и 7.953 МГц) в направлении магнитного зенита при ступенчатом повышении/снижении эффективной мощности излучения P_{eff} от 4 (56) до 580 МВт. Анализ выполнен по данным измерений радара некогерентного рассеяния (пространственно совмещенного с нагревным комплексом) и результатам численных расчетов.

Траекторные расчеты и оценка неотклоняющего поглощения в D-, E- и F-слоях ионосферы для нагревной волны выполнены в приближении геометрической оптики для слоистой ионосферы. В основу вычислений взяты формулы для показателей преломления и поглощения коротких радиоволн с учетом влияния магнитного поля и частоты соударений электронов [1]. Изменения высотных распределений электронной концентрации ионосферы $N_e(h)$ для каждого эксперимента определялись по данным радара (разрешение по высоте 3-10 км), а частот соударений электронов $\nu_e(h)$ по известным зависимостям, входными параметрами которых являлись также измерения радара.

Изучение результатов экспериментов позволили детально исследовать условия возбуждения и характеристики ионно-акустических и ленгмюровских плазменных волн, а также поведение мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) в зависимости от уровня электрических полей E волны накачки необыкновенной поляризации в высокоширотной F-области ионосферы. Рассмотрены условия, когда выполнялись следующие соотношения между f_H и критическими частотами слоя F2 обыкновенной f_oF2 и необыкновенной f_xF2 моды ($f_H < f_oF2$), ($f_H \sim f_oF2$) и ($f_oF2<f_H < f_xF2$). Получены оценки минимальных значений электрических полей в ионосфере $E_{ион}$ при X-нагреве необходимых для возбуждения ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности в F-области высокоширотной ионосферы.

Установлено различие в развитии искусственной ионно-акустической и ленгмюровской турбулентности при X-нагреве в зависимости от уровня напряженности поля волны накачки в ионосфере $E_{ион}$. Возбуждение ленгмюровских плазменных линий по данным измерений спектральных характеристик радара начинаются при более низких значениях $E_{ион}$ (на ~50–70 мВ/м ниже), чем начало возрастания мощности усиленных нагревом ионных линий. Минимальные значения электрического поля $E_{ион}$ для частот нагрева 7-8 МГц, необходимые для возбуждения ленгмюровских плазменных волн, составили 300–360 мВ/м и – 310–450 мВ/м для ионно-акустических волн.

1. Гинзбург В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. С. 684.

ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ В ИССЛЕДОВАНИЯХ НА СТЕНДЕ СУРА

Виноградов Г.Р., Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н.

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия,
grisha_vinogradov@list.ru

В работе представлены результаты исследования атмосферной турбулентности на высотах 80–110 км по результатам экспериментов в летние и осенние месяцы 2015–2019 гг. методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы, создаваемых мощным радиоизлучением нагревного стенда СУРА (56,15 N; 46,11 E) [1]. Определены такие параметры атмосферной турбулентности как скорость турбулентного движения, уровень турбопаузы, коэффициент турбулентной диффузии и скорость диссипации кинетической энергии. Вариации этих параметров проанализированы совместно с вариациями температуры нейтральной компоненты и скорости регулярного вертикального движения ионосферной плазмы, полученными в этих же измерениях методом ИПН. Уровень турбопаузы определялся как высота, ниже которой измеренное время релаксации сигнала, рассеянного неоднородностями, становится меньше, чем время релаксации, соответствующее диффузионному механизму их исчезновения после окончания воздействия на ионосферу [1,2]. При переходе от диффузионного разделения к турбулентному перемешиванию атмосферных газов (ниже уровня турбопаузы), неоднородности разрушаются быстрее, чем под действием амбиполярной диффузии, и время их релаксации определяется преимущественно турбулентной диффузией, что позволяет определить скорость турбулентного движения как функцию диффузионного времени и измеренного времени релаксации рассеянного сигнала. Приведем основные результаты исследования динамики атмосферной турбулентности на высотах мезосферы и нижней термосферы.

1. Скорость турбулентного движения определена в интервале высот 86–104 км. Значения усреднённой скорости изменялись от близких к нулю значений на высоте турбопаузы до 5–6 м/с (7–8 м/с в случаях естественных возмущений в атмосфере) на высотах 86–90 км.
2. Уровень турбопаузы изменялся в интервале высот 90–106 км в сентябре и 88–108 км в октябре. Минимально регистрируемый уровень турбопаузы находился на высоте 90–91 км, а максимальный уровень – на высоте 104–106 км.
3. Для ряда сеансов измерений выявлена положительная корреляция с коэффициентами 0,42 и 0,52 между величиной температуры нейтральной компоненты и уровнем турбопаузы.
4. Выявлена положительная корреляция с коэффициентами 0,52 и 0,63 между величинами скорости турбулентного и скорости регулярного вертикального движения среды на высотах 85,4 км и 91 км, что означает возможную перемежаемость турбулентности.
5. Установлено влияние волновых движений в атмосфере на динамику атмосферной турбулентности, проявляющееся в волнообразных вариациях турбулентной скорости и уровня турбопаузы с периодичностью от нескольких десятков минут до нескольких часов, характерных для ВГВ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 20-17-00050).

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью ИПН – Н. Новгород: ИПФРАН. 1999. 156 с.
2. Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I., Tolmacheva A.V., Zhemyakov I. N. // Atmosphere. 2019. 10(8). P. 450. https://doi.org/10.3390/atmos10080450.

ИССЛЕДОВАНИЕ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА НАГРЕВНЫХ СТЕНДАХ

Бахметьева Н.В.[1], Григорьев Г.И.[1], Виноградов Г.Р.[1], Жемяков И.Н.[1], Калинина Е.Е.[1], Першин А.В.[1], Юсупов К.М.[2]

[1]*НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru*
[2]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

В работе представлены результаты экспериментальных исследований нижней ионосферы при воздействии на нее мощным высокочастотным радиоизлучением и в регулярных условиях. На основе исследования D-области (60–90 км) методом частичных отражений, основанным на рассеянии радиоволн естественными плазменными неоднородностями, получены высотные профили электронной концентрации N(h), измеренные методом дифференциального поглощения, в естественных условиях и при искусственном воздействии на ионосферу излучением стенда СУРА (56,15 N; 46,11 E). Наблюдалось уменьшение электронной концентрации и рост температуры электронов во время нагрева ионосферы. N(h)-профили в области D изучены совместно с высотными зависимостями амплитуды сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями ионосферной плазмы (ИПН), создаваемыми излучением нагревного стенда, и времени релаксации неоднородностей по окончании нагрева [1,2]. Расслоение высотного N(h)-профиля интерпретируется как проявление слоя C ниже 70 км. Определена нижняя граница области высот, обогащенной атомарным кислородом [3].

На стадии релаксации неоднородностей получены высотно-временные зависимости параметров нейтральной и ионизованной компонент на высотах мезосферы и нижней термосферы (60–130 км): температуры и плотности нейтральной атмосферы, скоростей регулярного вертикального и турбулентного движений среды, уровня турбопаузы, электронной концентрации. Исследованы высотно-временные вариации этих параметров, в том числе, в периоды существования развитых спорадических слоев, ярко выраженной турбулентности и неустойчивостей среды распространения. Показано, что распространение атмосферных волн разных пространственно-временных масштабов во многом определяет характер этих вариаций. Сделаны оценки атомной массы и относительной концентрации преобладающих металлических ионов в спорадическом слое E (E_s), которые обеспечивают появление локальных максимумов на высотном профиле времени релаксации ИПН. Наиболее часто этими ионами являются положительные атомарные ионы железа. Исследовано влияние длительного воздействия на ионосферу на поведение спорадического слоя E.

Обсуждаются вопросы развития исследований ионосферы методом ИПН на нагревных стендах в высоких и низких широтах и результаты выполненных на них экспериментов по диагностике нижней ионосферы и нейтральной атмосферы [4].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-17-00050.

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью ИПН – Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999. 156 с.
2. Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I., Tolmacheva A.V., Zhemyakov I. N. // Atmosphere. 2019. **10**(8). P. 450. https://doi.org/10.3390/atmos10080450.
3. Bakhmetieva N.V., Kulikov Y.Y., Zhemyakov I. N. // Atmosphere. 2020. **11**. P.1154. https://doi.org/10.3390/atmos11111154.
4. Бахметьева Н.В., Грач С.М., Сергеев Е.Н., Шиндин А.В. // Труды XXVI Всероссийской открытой научной конференции (Казань, 1–6 июля 2019 г.): в 2 т. – Казань: Изд-во Казан. ун-та, 2019. Т. **2**. С. 16–20.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПЛОТНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ФОНОВОЙ ПЛАЗМЕ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ СТЕНДЕ "КРОТ": НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Гущин М.Е., Айдакина Н.А., Гундорин В.И., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Лоскутов К.Н., Николенко А.С., Стриковский А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mguschin@ipfran.ru

Плазменный стенд «Крот», созданный в ИПФ РАН для моделирования явлений в ионосферной плазме, благодаря большим объемам рабочей камеры и уникальным характеристикам электрофизического оборудования позволяет практически полностью исключить влияние стенок камеры на исследуемые процессы, и реализовать режим «безграничной» ионизации, приближающий условия моделирования к космическим. В последние несколько лет на стенде исследуется динамика плотных высокоскоростных плазменных струй, расширяющихся в вакуум и в фоновую плазму во внешнем магнитном поле в условиях, моделирующих активные эксперименты в ионосфере. Для генерации плазмы используются коаксиальные плазменные пушки. В ходе кампаний 2019 и 2020 года реализованы новые редакции экспериментов, получены новые результаты в части диагностики параметров плазмы и развивающихся неустойчивостей. Выполнены эксперименты по инжекции плазменной струи поперек сильного магнитного поля, сопровождаемые формированием «плазменного листа» – структуры, вытянутой вдоль линий магнитного поля, и сильно сжатой в направлении поперек направления движения потока. С использованием различных диагностических методик определены параметры плазмы в листе; показано, что длина струи в лабораторных условиях иметь масштаб поперек магнитного поля более 1 метра. При инжекции вдоль магнитного поля исследовано взаимодействие плазменной струи с магнитными препятствиями, формируемыми дополнительными катушками, устанавливаемыми в главном соленоиде установки. Рассмотрены различные неустойчивости, развивающиеся в плазменных струях, включая электромагнитные на высокоэнергетической стадии расширения – и структурные, наблюдаемые при распаде плазмы на поздних временах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект №18-29-21018 мк.

МЕТОД МНОГОЧАСТОТНОГО ДОПЛЕРОВСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ: НЮАНСЫ И ВОЗМОЖНОСТИ

Моисеев С.П., Шиндин А.В., Сергеев Е.Н.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, geothermalnn@mail.ru

Метод многочастотного доплеровского зондирования используется для восстановления профиля электронной концентрации в ионосфере с 80х годов. Суть метода заключается в излучении мощного радиоимпульса с широким спектром и регистрации отраженного от ионосферы сигнала с последующим нахождением фазового спектра. Отражение каждой спектральной компоненты излученного импульса происходит на своей высоте. Фазовый спектр принимаемого сигнала будет определяться временными задержками прихода каждой спектральной компоненты, которые в свою очередь зависят от высоты отражения. Изменения фазы отдельных компонент регистрируемого сигнала между двумя излученными (диагностическими) импульсами определяются вариациями высоты отражения соответствующих компонент. Изменение фазы регистрируемого сигнала связано с изменением высоты отражения для соответствующей спектральной компоненты интегральным уравнением. Восстановление профиля в заданный момент возможно при условии наличия начального профиля электронной концентрации, определяемого, например, с помощью ионозонда или радара некогерентного рассеяния. Основное преимущество метода многочастотного доплеровского зондирования по сравнению с классическим методом вертикального зондирования — более высокое временное и высотное разрешение зондирования (~100 мс и ~200 м), определяемое периодом следования импульсов и полосой приема (амплитудой импульса) регистрируемой аппаратуры соответственно.

В докладе представлены методика и предварительные результаты моделирования поведения диагностических волн в экспериментах по многочастотному доплеровскому зондированию с целью поиска оптимального сценария обработки экспериментальных данных, выяснения границ применимости и нюансов использования метода. Производился численный расчёт амплитуды электрического поля методом конечных разностей во временной области при «искусственном» (модельном) включении модификации профиля электронной концентрации. Одномерная счётная область включала в себя слой изотропной неоднородной плазмы с параметрами, характерными для ионосферы и изменяющимися во времени. В качестве падающей волны используется короткий радиоимпульс с шириной спектра ~ 800 кГц. С помощью проведенного моделирования оценена предельная скорость изменения высоты отражения (~1 км/с при периоде следования импульсов 100 мс), которая может быть определена исследуемым методом. Проведен анализ и найдены оптимальная длительность временного окна для спектрального анализа отраженного импульса, параметры НЧ фильтрации для условий реального эксперимента. Проведена оценка влияния шумов в регистрируемом сигнале на результат восстановления профиля электронной концентрации в широком динамическом диапазоне.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 20-32-70198 и РНФ № 20-12-00197.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА СНИМКОВ НОЧНОГО НЕБА И КАРТ ВАРИАЦИЙ ПЭС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ДИНАМИКИ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, ВОЗМУЩЕННОЙ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА

Когогин Д. А.[1], Насыров И. А. [1], Шиндин А. В. [2], Грач С. М. [2], Максимов Д. С. [1], Загретдинов Р. В. [1], Белецкий А. Б. [3]

[1] *КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com*

[2] *ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия*

[3] *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

С 2010 года на стенде СУРА начали проводиться регулярные синхронные измерения интенсивности искусственного свечения ионосферы в красной линии атомарного кислорода (λ=630 нм) и вариаций полного электронного содержания (ПЭС) вдоль радиотрасс «навигационный спутник - наземный пункт» при пролёте навигационного спутника (НС) над возмущённой областью ионосферы (ВО) в поле зрения ПЗС камеры направленной на ВО [1]. В ранних экспериментах 2010-2014 гг. измерения проводились на одиночном луче «НС-п. Васильсурск». В них было установлено, что положение пятна искусственного свечения в максимуме яркости при прохождении траектории луча «НС-п. Васильсурск» через его центр, соответствовало минимальным значениям ПЭС. Однако ограничения в постановке подобного эксперимента, подробно описанные в работах [1,2], подтолкнули авторов к развитию данного метода, путем привлечения большего количества данных ГНСС радиозондирования и добавления новых пунктов регистрации оптического свечения. В результате была получена возможность построения детализированных карт вариаций ПЭС как в узко локализованной области ионосферы, ограниченной размерами главного лепестка диаграммы направленности стенда СУРА, так и на значительном расстояния от центра ВО и проведения прямого пространственно-временного сопоставления между вариациями искусственного свечения ионосферы и ПЭС, стимулированными работой стенда СУРА [2].

На основе анализа пространственного положения и поведения во времени пятен искусственного свечения ионосферы на изображениях ночного неба и соответствующей им области на картах вариаций ПЭС был сделан вывод о том, что область максимальной яркости пятна свечения пространственно локализована в области минимума интенсивности вариаций ПЭС и наоборот - область максимума интенсивности вариаций ПЭС соответствует области минимума яркости искусственного свечения. Формирующаяся после каждого включения волны накачки стенда СУРА, полость с пониженной электронной концентрацией в области генерации искусственного свечения ионосферы, варьируется в диапазоне $\Delta N_e/N_e \sim 4\div9$ %. Именно в этой полости происходит одновременное нарастание плотности потока мощности ВЧ радиоволны и потока сверхтепловых электронов, ускоренных плазменной турбулентностью [3]. Предложенный метод снимает ограничения, связанные с необходимостью пролета навигационного спутника непосредственно над ДН стенда СУРА, что существенно увеличивает шансы успешного проведения синхронных измерений вариаций ПЭС и интенсивности стимулированного свечения в экспериментах по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 19-72-00072).

1. Грач С.М., Насыров И.А., Когогин Д.А., Шиндин А.В., Дементьев В.О., Сергеев Е.Н., Акчурин А.Д. //Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 3. С. 181-197.
2. Когогин Д.А. Насыров И.А., Шиндин А.В., Грач С.М., Максимов Д.С., Загретдинов Р.В., Дементьев В.О. // Изв. вузов. Радиофизика. 2020. Т. 63. № 2. С. 89-104.
3. Клименко В. В., Грач С. М., Сергеев Е. Н., Шиндин А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60. № 6. С. 481-501.

ДИНАМИКА ОБЛАСТЕЙ РАКУРСНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН Е-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ РЛС ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Тютин И.В., Арешин С.А.

ОАО «НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия, tyutin@physics.msu.ru

Эхо сигналы от авроральной ионосферы, например, ракурсное рассеяние радиоволн (РРР), известно и изучается уже около 80 лет. Это явление связано с сильным анизотропным рассеянием радиоволн на полеориентированных неоднородностях концентрации плазмы, известных как неоднородности аврорального Е-слоя ионосферы. Последние создают сильные помехи для радаров УКВ диапазона. Экспериментальные данные по регистрации анизотропного рассеяния на ионосферных неоднородностях слоя Е, полученные на радарах в режиме непрерывного сканирования по азимуту в течение продолжительного интервала времени, в литературе практически не рассматривались и поэтому представляют определенный интерес.

В работе представлен анализ пространственных характеристик областей ракурсного рассеяния радиоволн за 2018 год. Сигналы РРР регистрировались радаром УКВ диапазона в Красноярском крае с северной ориентацией сектора обзора.

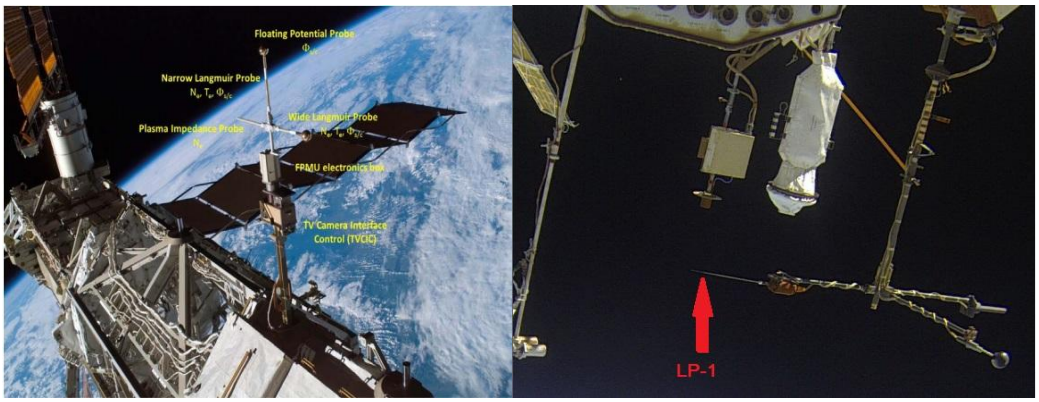
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТЕНЦИАЛА И ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ЗОНЕ МКС ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ «ОБСТАНОВКА (1 ЭТАП) НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС И FPMU НА АМЕРИКАНСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС.

В.А.Грушин[1], С.И.Климов[1], Б.Киров[2], Е.М.Твердохлебова[3], Д.И.Новиков[1], Л.А.Осадчая[1]

1- ИКИ РАН, Москва, 2- ИКИТ Болгарской академии наук,3-ФГУП ЦНИИмаш,

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, vgrushin@iki.rssi.ru

Зонд Ленгмюра ЗЛ-1 в составе эксперимента Обстановка -1 этап[1] и зонды Ленгмюра WLP и NLP в составе эксперимента Floating Potential Measurement Unit[2] одновременно выполняли измерения в период 2013 и 2014 гг.



Смонтированные на противоположных концах МКС и на противоположных сторонах по отношению к Земле, зонды показывают качественно сходные результаты. Нами предпринята попытка обнаружить различия, которые можно было бы связать с разной удалённостью от массивов солнечных батарей. Это непросто сделать на фоне различных локальных затенений приборов, которые обусловлены конфигурацией МКС.

1. С.И. Климов, В.А. Грушин, К. Балайти и др. Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперементе «*Обстановка (1 этап)*» на Российском сегменте МКС // Космическая техника и технологии № 1(15)/2021, с. …

2. Aroh Barjatya, Charles M. Swenson, Donald C. Thompson, *and* Kenneth H. Wright Jr. Invited Article: Data analysis of the Floating Potential Measurement Unit aboard the International Space Station. Review of Scientific Instruments 80, 041301 (2009); https://doi.org/10.1063/1.3116085

ПРЯМАЯ ДИАГНОСТИКА ТРАЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОСИГНАЛА, ОТРАЖЕННОГО ОТ СЛУЧАЙНО-НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Афанасьев Н.Т.[1], **Танаев А.Б.**[1], **Чудаев С.О.**[2]

[1]*ИГУ, г. Иркутск, Россия,* spacemaklay@gmail.com
[2]*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия.*

Приближенная оценка ожидаемых статистических характеристик декаметровых радиосигналов, отраженных от случайно-неоднородной ионосферы, представляется важной для решения ряда прикладных задач [1,2]. Поскольку параметры ионосферных неоднородностей известны с некоторой долей вероятности надежный расчет характеристик сигналов не всегда возможен. Между тем предварительное восстановление неоднородностей по характеристикам принятого пробного сигнала на реперной трассе, подобной по своим свойствам заданной трассе, позволяет оценить характеристики сигнала, отраженного от ионосферы. Ключевым вопросом для оценки ожидаемых характеристик сигналов на заданных наклонных трассах является правильный выбор реперной трассы для пробного источника. Пункт излучения пробного сигнала может находиться на некотором расстоянии от пункта приема основного сигнала, а пункт приема встречного пробного сигнала совпадает с пунктом излучения основного сигнала. Представления о возможных трассах пробного источника для оценки статистических характеристик основного сигнала, отраженного от ионосферы, можно получить с помощью моделирования траекторной картины на основе уравнений геометрической оптики. Анализ выполненных расчетов показал, что в зависимости от геофизических условий, для заданной наклонной трассы можно найти ряд реперных трасс.

Для решения обратной задачи на реперной трассе в докладе получены аналитические интегральные формулы, связывающие статистические траекторные характеристики пробного сигнала и параметры эффективного корреляционного эллипсоида ионосферных неоднородностей. В качестве измеряемых характеристик пробного декаметрового сигнала, принятого в пункте излучения основного сигнала, рассматривались вторые статистические моменты фазы, групповой задержки и доплеровского смещения частоты. Использовалась модель пространственной зависимости неоднородной части корреляционного эллипсоида, самосогласованная с изменением средней диэлектрической проницаемости ионосферы и учитывающая динамику степени возмущенности плазменной среды на трассах различной протяженности. Расчет статистических моментов траекторных характеристик был выполнен с учетом флуктуаций траектории, возникающих при решении стохастической траекторной задачи с граничными условиями в пунктах излучения и приема реперного сигнала. Восстановленные обобщенные параметры случайного поля неоднородностей, выраженные через статистические траекторные характеристики реперного сигнала, были использованы в расчетах характеристик основного сигнала на заданной наклонной радиотрассе. Получены явные функциональные соотношения, позволяющие проводить прямую диагностику ожидаемых статистических траекторных характеристик основного сигнала в пункте назначения по характеристикам принятого реперного сигнала. Приведены результаты численных экспериментов для определения дисперсий фазы, групповой задержки и доплеровского сдвига частоты основного сигнала на заданной односкачковой трассе по данным измерений этих характеристик пробного сигнала на вспомогательной трассе.

1. Благовещенский Д.В., Жеребцов Г.А. Высокоширотные геофизические явления и прогнозирование коротковолновых радиоканалов. М.: Наука, 1987. 272 с.
2. Rawer K. Wave propagation in the ionosphere. Dordrecht: Springer Netherlands, 1993. 479 p.

ВОЗМУЩЕНИЯ GPS СИГНАЛОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ОБЛАСТИ КАСПА ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА АРХИПЕЛАГЕ ШПИЦБЕРГЕН

Белаховский В.Б.[1], **Джин Я.**[2], **Милош В.** [2]

[1] – *Полярный геофизический институт, г. Апатиты*
[2] – *Университет Осло, г. Осло, Норвегия*

E-mail: belakhov@mail.ru

По данным сцинтилляционного GPS приемника на станции Ню-Алезунд (NYA) на архипелаг Шпицберген исследован отклик сигналов GPS спутников на прохождение области каспа. Касп – область открытых силовых линий в околополуденном секторе, занимающая около 3 часов по MLT и несколько градусов по широте. Для идентификации области каспа использованы данные радара SuperDARN в Hankasalmi по уширению спектра отраженного от ионосферы сигнала. Также для идентификации области каспа использованы оптические наблюдения полярных сияний в эмиссиях 630.0 нм, 557.7 нм Полярного геофизического института (обсерватория Баренцбург), университета Осло (станция NYA). По данным радара EISCAT 42m на архипелаге Шпицберген, луч которого направлен вдоль геомагнитного поля, в момент прохождения области каспа на высотах примерно 100-200 км не наблюдается заметного роста концентрации ионосферной плазмы, выше 200 км наблюдается рост концентрации Ne, что говорит о наличии более “мягких” высыпаний заряженных частиц.

При прохождении области каспа обнаружен рост полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы с 4 до 12 TECU, рост ROT (rate of TEC) достигает 6 TECU/мин в этот момент. Также при прохождении области каспа наблюдается рост фазового индекса сцинтилляций до 0.4 радиан. Однако рост фазового индекса сцинтилляций наблюдался и до прохождения каспа, что, по-видимому, связано с утренними высыпаниями заряженных частиц, как можно видеть из данных радара EISCAT 42m, оптических данных. Заметного роста амплитудного индекса сцинтилляций в момент прохождения станцией NYA каспа не обнаружено.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ (ОТ ГЕССА ДО НАШИХ ДНЕЙ)

Булатова Н.П.

ИФЗ РАН (экс), г. Москва, Россия, n.p.bulatova@mail.ru

Ионизирующее излучение в атмосфере наблюдалось учеными с начала XX века. В то время предполагалось, что скорость ионизации будет уменьшаться по мере увеличения расстояния от Земли (источника излучения) из-за падения уровня ее радиоактивности.

Виктор Гесс, проводя измерения при подъеме вертикально вверх в гандоле аэростата, обнаружил, что в действительности, по мере удаления от Земли, по неизвестной причине скорость ионизации наоборот начинала расти. Систематически измеряя излучение на высотах до 5,3 км в течение 1911-12 гг. и днем и ночью, с риском для жизни показал, что уровень радиации снижался на высоте около 1 км, но выше значительно возрастал. Он пришел к выводу, что излучение проникало в атмосферу из космоса, он назвал его космическими лучами.

За эту работу, которая привела его к открытию, в 1936 году Гесс вместе с Карлом Дэвидом Андерсоном получил Нобелевскую премию по физике. Это открытие Гесса стимулировало появление новых открытий в физике элементарных частиц и ядерной физике.

В настоящее время ученые проводят измерения: скорость потоков, интенсивность лучей, падающих на поверхность Земли, их виды, превращения и т. д.. Так, например, одновременное проведение измерений интенсивности частиц (протонов) высокой энергии на высотах ~ 100 км, 10 км и 0 км показало, что интенсивность (в процентах) сохранившихся частиц, измеренных одновременно, остается постоянной, на всех высотах.

О ВЛИЯНИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ФЛУКТУАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В СЕВЕРНОМ ПОЛУШАРИИ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИССИИ SWARM В 2014 – 2015 ГГ.

Волобоев Л.А., Захаров В.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия, l.voloboev@mail.ru

В работе рассматриваются вопросы исследований статистики флуктуаций электронной концентрации в ионосфере Земли в различных гео-гелиофизических условиях по данным спутниковых in-situ измерений.

Источником экспериментальных данных служит массив высокочастотных наблюдений со спутниковой миссии Swarm ESA, предназначенной для изучения магнитного поля Земли. Миссия стартовала в 2013 г. и состоит из трёх спутников на различных полярных орбитах с высотой от 460 км до 530 км. На каждом космическом аппарате, помимо основного магнитометрического оборудования, установлены зонды Ленгмюра, ведущие измерения электронной концентрации с высокой частотой опроса.

В настоящей работе использованы данные об электронной концентрации, полученные с частотой 2 Гц. Вычисляется средняя мощность шумов флуктуаций – индекс аналогичный амплитудному индексу сцинтилляций S4, подбираются окна фильтрации, соответствующие требуемому пространственному разрешению (так окно размером 20 отсчетов соответствует 10 с или 74 км). Вычисляется индекс RODI (Rate of Change of Density Index).

На основе базы данных индексов Kp и AE магнитного поля рассматривается влияние солнечной активности на флуктуации электронной концентрации в северном полушарии в 2014 – 2015 гг. Для исследования были отобраны дни с возмущенной (Kp > 4) и спокойной (Kp = 1-2) геомагнитными обстановками. В каждом из выбранных случаев вычислены индексы S4 и RODI10s.

Рассчитаны коэффициенты корреляции индексов S4 и RODI10s с высокоширотным индексом AE для 37 и 31 отобранного случая в течение 2014 - 2015 годов, соответственно, по данным спутников Swarm A, B и C.

Так для 2014 года в случае с возмущенной геомагнитной обстановкой (25 случаев) наблюдается слабая положительная связь. В случае со спокойной геомагнитной обстановкой (среднее значение за 12 случаев) коэффициент корреляции $r < 0,2$ — связь отсутствует.

Предварительные исследования показали, что амплитудный индекс сцинтилляций S4 чувствителен к глобальным вариациям индекса AE и не менее, чем индекс RODI чувствителен к высокоширотным вариациям электронной плотности, что позволяет использовать предложенный индекс для изучения ионосферных возмущений.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ СПРАЙТОВ

Кириллов А.С.

ПГИ, г. Апатиты, Мурманская область, Россия, kirillov@pgia.ru

Спрайты представляют собой крупные светящиеся разряды в диапазоне высот атмосферы Земли от 40 до 90 км после интенсивных разрядов молний между грозовыми облаками и землей [1-3]. Большинство исследований спектров спрайтов и электронной кинетики молекул в средней атмосфере Земли [4-6] ограничивались моделированием электронной кинетики триплетных состояний N_2 на высотах свечения спрайтов. Кроме того, электронная кинетика триплетов и ее роль в химическом и тепловом балансе атмосферы были тщательно изучены в лабораторных условиях стримерного разряда.

Основная цель данной работы - исследование влияния электронно-возбужденных триплетных состояний молекул N_2 на образование синглетных состояний O_2 в средней атмосфере во время спрайтов с учетом процессов столкновения на этих высотах. Численно показаны влияние неупругих столкновений молекул на колебательные населенности молекул $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ при атмосферных разрядах и зависимость вкладов триплетного молекулярного азота в образование синглетного кислорода от плотности атмосферы. Относительный вклад молекулярных столкновений более выражен на высоте 70 км и уменьшается с увеличением плотности атмосферы. Кроме того, впервые показано, что существует значительное влияние $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ на населенности $O_2(a^1\Delta_g,v=0$ и 2). Рассчитанный вклад $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ увеличивается с ростом высоты. Возбуждение рассмотренных состояний $O_2(a^1\Delta_g,v=0)$ и $O_2(a^1\Delta_g,v=2)$ молекулами $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ связано с межмолекулярным переносом энергии электронов [7] и электронно-колебательным процессом [8], соответственно.

1. Sentman D.D. et al., 1995, Geophys. Res. Lett., v.22, p.1205-1208.
2. Pasko V.P., 2007, Plasma Source Sci. Technol., v.16, S13-S29.
3. Pasko V.P. et al., 2012, Space Sci. Rev., v.168, p.475-516.
4. Morrill J.S. et al., 1998, J. Atm. Sol. Terr. Phys., v.60, p.811-829.
5. Gordillo-Vazquez F.J., 2010, J. Geophys. Res.: Space Phys., v.115, A00E25.
6. Gordillo-Vazquez F.J. et al., 2012, J. Geophys. Res.: Space Phys., v.117, A05329.
7. Кириллов А.С., 2012, Квант. Элек., т.42, №7, с.653-658.
8. Kirillov A.S., 2013, Chem. Phys., v.410, p.103-108.

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ ПОЛОС ЛАЙМАНА-БИРДЖА-ХОПФИЛДА В АТМОСФЕРАХ ЗЕМЛИ И ТИТАНА

Кириллов А.С.

ПГИ, г. Апатиты, Мурманская область, Россия, kirillov@pgia.ru

При взаимодействии высокоэнергичных частиц и фотоэлектронов с молекулами азота в верхних атмосферах Титана [1-3] и Земли [4-7] происходит возбуждение синглетных электронно-возбужденных состояний N_2, которое приводит к свечению полос Лаймана-Бирджа-Хопфилда. Исследование кинетики синглетных состояний молекулярного азота в верхних атмосферах Титана и Земли за последние годы проводилась во многих работах [7-11]. В указанных работах были рассмотрены различные излучательные переходы между синглетными состояниями, процессы гашения электронно-возбужденных состояний N_2 при столкновениях с молекулами атмосферных газов, особенности свечения полос Лаймана-Бирджа-Хопфилда в атмосферах этих планет. В настоящей работе при расчете колебательных населенностей электронно-возбужденных синглетных состояний молекулярных азота были учтены как внутримолекулярные, так и межмолекулярные процессы переноса энергии электронного возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях [12, 13]. Расчеты показали, что с уменьшением высоты атмосфер возрастает вклад процессов гашения синглетных состояний $a'^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$, азота при неупругих молекулярных столкновениях. Это приводит к изменению соотношения интегральных интенсивностей полос Лаймана-Бирджа-Хопфилда при высыпании в атмосферы данных планет высокоэнергичных частиц различных энергий.

Работа поддержана грантом № 075-15-2020-780 Министерства науки и высшего образования РФ.

1. Ajello J.M. et al., 2007, Geophys. Res. Lett., v.34, L24204.
2. Ajello J.M. et al., 2008, Geophys. Res. Lett., v.35, L06102.
3. Stevens M.H. et al., 2011, J. Geophys. Res., v.116, A05304.
4. Huffman R.E. et al., 1980, J. Geophys. Res., v.85, A5, p.2201-2215.
5. Torr M.R. et al., 1994, J. Geophys. Res., v.99, №A11, p.21397-21407.
6. Budzien S.A. et al., 1994, J. Geophys. Res., v. 99, №A12, p.23275-23287.
7. Eastes R.W. et al., 2011, J. Geophys. Res., v.116, A12308.
8. Eastes R.W., 2000, J. Geophys. Res., v.105, A8, p.18557-18573.
9. De La Haye V. et al., 2008, J. Geophys. Res., v.113, A11314.
10. Campbell L. et al., 2010, J. Geophys. Res., v.115, A09320.
11. Lavvas P. et al., 2015, Icarus, v.260, p.29-59.
12. Кириллов А.С., 2011, ЖТФ, т.81, №12, с.34-38.
13. Kirillov A.S., 2011, J. Quan. Spec. Rad. Tran., v.112, №13, p.2164-2174.

ФОРМИРОВАНИЕ МАГНИТОЗВУКОВОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ СТРУКТУРЫ НА ФРОНТЕ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ПЛАЗМЕННОГО ОБЛАКА

Ковалев А.Т., Ковалева И.Х., Зецер Ю.И.

ИДГ РАН, г. Москва, Россия, akoval@idg.chph.ras.ru

Разлёт плотного горячего сгустка плазмы в вакуум или разреженную фоновую плазму исследуется на протяжении нескольких десятилетий как в лаборатории, так и в активных ионосферных экспериментах. Многие связанные с этим процессом вопросы до настоящего времени не имеют полного теоретического описания. Активный ионосферный эксперимент «Северная звезда» [1] продемонстрировал аномально большой разлёт поперек геомагнитного поля, медленное остывание плазмы в сравнении с модельными представлениями, ускорение ионов во время фазы разлета как на переднем, так и на заднем фронте струи.

Связывая эти явления с плазменными процессами, происходящими в струе, был проведён реанализ экспериментальных данных, на основе которых можно сделать следующие выводы: в процессе разлёта струи в возбужденной плазме постоянно формирующегося предвестника возникает бесстолкновительная ударная волна сначала в суперкритическом, а затем в субкритическом режиме. В последнем случае квазипостоянная структура поджатия магнитного поля и экстремума электрического потенциала вдоль направления движения струи воспроизводится непрерывно при разлете струи и регистрируется датчиками, разнесёнными на расстояние ~ 1 километра и проходящими фронт плазменной струи через доли секунды. Формирование электростатического ударного фронта фиксируется в лабораторных экспериментах и теоретически описывается с привлечением представлений о ионно-звуковых солитонах (например, [2-3]). В условиях ионосферы, когда струя плазмы распространяется поперек геомагнитного поля и масштаб плазменного облака занимает пространство ~ километра, невозможно рассматривать плазменные процессы без учёта магнитного поля. Поэтому было сделано предположение о формировании на фронте плазмы магнитозвукового солитона [4,5]. Распределение поджатия магнитного поля и потенциала при таком описании фронта совпадает с экспериментальными данными.

МГД Моделирование бесстолкновительного разлёта плазменной струи поперек геомагнитного поля так же подтвердило предложенную гипотезу. Расчеты проводились в 2.5D геометрии по двухжидкостной схеме в параметрах, соответствующих эксперименту «Северная звезда». Расчеты показывают формирование устойчивой структуры квазипостоянного электрического поля на фронте струи в области максимального градиента магнитного поля, По форме она близка к измеряемому в эксперименте и соответствует формированию магнитозвукового солитона на фронте струи. При реализации такого механизма движения бесстолкновительного фронта поперек магнитного поля должны включаться процессы нагрева ионов. Это может дать объяснения целому ряду эффектов, зафиксированных в эксперименте.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0146-2017-0013.

1. Erlandson R. E, Meng C.I, Zetzer J.I., *et al* // Journ. of Spacecraft and Rockets, 2004. V. **41**. No. 4. P. 483.

2. G. Sarri G., Dieckmann M.E., Kourakis I. *et al* M. // Phys. Rev. Lett. 2009. V. **107.** P. 025003.

3. Гарасев М.А, Корытин А.И., Кочаровский В.В., и др. // Письма в ЖЭТФ 2017. Т. **105**. вып. 3. С. 148 – 152.

4. Gueroult R., Ohsawa Y., and N.J. Fisch, Role of magnetosonic solitons in perpendicular collisionless shock reformation, Phys. Rev. Lett. 2017. V.**118**. P. 125101.

5. Ковалев А.Т., Ковалева И.Х., Зецер Ю.И. // Динамические процессы в геосферах 2020. вып.12. С. 140.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТКЛИКА ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНУЮ ВСПЫШКУ X КЛАССА 6 СЕНТЯБРЯ 2017 ГОДА ПО ДАННЫМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СЕТИ ГНСС СТАНЦИЙ НА ТЕРРИТОРИИ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РФ

Насыров И.А., Максимов Д.С., Когогин Д. А., Загретдинов Р. В.

КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com

В последнее десятилетие на территории РФ, особенно в европейской ее части, отмечается существенный рост количества постоянно действующих ГНСС-станций. Согласно данным представленным на официальном сайте РОСРЕСТРА в разделе «Открытые данные - Отчеты о создании геодезических сетей специального назначения» (https://cgkipd.ru/opendata/GSSN/) на конец декабря 2020 года имеется информация о 551 ГНСС станции региональных и коммерческих операторов сетей высокоточного позиционирования на территории РФ.

В Казанском (Приволжском) федеральном университете в настоящий момент функционирует система автоматического сбора и обработки ГНСС данных, полученных с более чем 600 стационарных ГНСС станций, расположенных на территории РФ [1].

Существенный рост количества ГНСС станций, оснащенных многочастотными приёмниками геодезического класса, позволяющими принимать сигналы большинства действующих ГНСС созвездий (ГЛОНАСС, GPS, Galileo, BeiDou и др.) открывает возможность построения региональных карт распределения интенсивности вариаций ПЭС/ карт ROTI и других индексов ионосферной возмущенности с высоким пространственно-временным разрешением. Это в свою очередь позволяет исследовать отклик верхней атмосферы на экстремальные гелиогеофизические события, такие как магнитные бури, солнечные вспышки, регулярные события, например, прохождение солнечного терминатора, землетрясения и процессы их подготовки, действие тропических циклонов и внезапных стратосферных потеплений, искусственные воздействия на ионосферу мощным коротковолновым радиоизлучением, антропогенные воздействия на ионосферу, например, ракетными запусками и инжекцией активного вещества при работе маневровых двигателей космических аппаратов [2].

В докладе, используя собственные архивные 30-сек ГНСС данные по 109 станциям расположенных в широтно-долготном секторе [51.5°÷62.8° с.ш.; 37.2°÷58.8° в.д.] проведено измерение возмущенности околоземного космического пространства, с помощью построения 30-ти минутных динамических карт вариаций ПЭС и 15-ти минутные карты ROTI над территорией европейской части РФ в день сильнейшей солнечной вспышки X класса за 24-й цикл солнечной активности, зарегистрированной 6 сентября 2017 г. [X9.3]. Дополнительно карты вариаций ПЭС и карты ROTI были построены за сутки до и после начала вспышки, т.е. 5 и 7 сентября 2017 г.

1. Бахтиаров В.Ф., Загретдинов Р. В. Обзор постоянных gnss станций на территории Российской Федерации // Сборник докладов IX Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем», 2-3 сентября 2020 г. С. 19-24,
2. Ясюкевич Ю.В., Едемский И.К., Перевалова Н.П., Полякова А.С. Отклик ионосферы на гелио- и геофизические возмущающие факторы по данным GPS: монография. Иркутск :Изд-во ИГУ, 2013. 271 с.

О ПОДОБИИ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ И КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Мальцева О.А., Никитенко Т.В.

НИИФ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия, mal@ip.rsu.ru

Космическая погода влияет на ионосферу, от состояния которой зависит работа многих систем связи, пеленгации, навигации и других. Состояние ионосферы можно описать критической частотой foF2. Известно, что во время возмущений данные foF2 могут иметь пробелы. Одним из способов их заполнения является использование полного электронного содержания TEC в силу подобия их поведения. Это подобие вытекает из пропорциональности TEC и NmF2 через эквивалентную толщину ионосферы τ. Во многих работах показано, что временные пробелы foF2 в одной точке хорошо заполняются с использованием τ. В данной работе это подобие используется для заполнения пространственных пробелов, которые могут иметь место, например, вдоль какого-либо меридиана, если вдоль него имеется некоторое количество ионозондов. Известно, что сеть ионозондов не очень густая, но существует достаточно плотная сеть GPS приемников и глобальные карты TEC. Для построения широтной зависимости foF2 предлагается строить широтную зависимость τ по данным имеющихся ионозондов с помощью полиномиальной аппроксимации и затем использовать TEC в точках вдоль меридиана. Для примера выбран меридиан 30°N и две серии магнитных бурь. Одна – период 7-17 марта 2012, рекомендованный SCOSTEP и изученный во многих работах. Другая – наиболее сильное возмущение 2020 года (20-21 апреля). Изучение проводится в сравнении этих случаев. В первом случае широтная зависимость τ строилась по данным станций Мурманск, Москва, Ростов, Афины и степень полинома была равна 1-2 с достоверностью 0.7-0.99. Во втором случае использовались данные станций Тромсё, Ленинград, Москва, Ростов, Никосия, степень полинома была равна 3 с достоверностью 0.5-0.99. В первом случае диапазон широт включал 30°-70°, во втором – 35°-70°. В первом случае обнаружены ярко выраженные особенности поведения foF2, совпадающие в отдельных широтных зонах с результатами, полученными в других работах. Во втором случае характер возмущений прослеживается четко, однако относительные отклонения δ(foF2) не выходят за пределы -15%÷+25%, которые свойственные вариациям день ото дня. Сходство сводится к положительным возмущениям во время главной фазы магнитной бури и затяжной фазе восстановления.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0852-2020-0015.

ФУНДАМЕНТАЛЬНОСТЬ ЯВЛЕНИЯ ОПЕРЕЖЕНИЯ НАЧАЛА МАГНИТНОЙ БУРИ ОДНИМ ИЗ ТИПОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Мирмович Э.Г., *к.ф.-м.н., доцент*

ГБПОУ МО «Химкинский техникум», г. Химки, mirmovich1940@mail.ru

В качестве эпиграфа. В память о двух известных учёных в космофизической области: Ю.И. Гальперине и Э.С. Казимировском, ушедшими от нас в разное время.

На одном из симпозиумов COSPAR в Мадриде во время доклада одного из учёных об якобы открытом им факте опережения положительной фазой ионосферного возмущения начала магнитной бури Ю.И.Г., воскликнул: ««So, it is entirely, completely Mirmovich!» (Так, это же сплошной Мирмович), а второй из них, присутствовавший и там, и на защите диссертации автора как член Диссовета – Э.С.К., этот случай рассказал автору.

Исследуя известный в литературе уникальный по интенсивности период солнечной деятельности 2–11 августа 1972 года, сопровождавшийся целой цепочкой солнечных вспышек класса X, вызвавших в дневной ионосфере, как и полагается, соответствующие эффекты в области E и D, автором было открыто абсолютно новое в гелиогеофизических исследованиях явление – положительные возмущения (ПВ) в области F ионосферы до геомагнитных SSC-эффектов, а также и без них, а последующих за ПВ магнитных бурь с постепенным началом, и опубликовано в зарубежной печати [1]. Это открытие было опубликовано автором в ряде последующих работ 1978–1981 гг. и защищено диссертацией в качестве защищаемого положения [2]. Практически одновременно аналогичный эффект в предштормовой интерпретации заметил по данным наблюдений в приэкваториальной ионосфере бразильский исследователь ионосферы и геомагнитного поля R.P. Kane [3, 4]. Актуальность и научная ценность этого открытия подтверждается более поздними работами многих авторов с признанием отсутствия физической модели данного явления.

Автором этот эффект был связан не с электроджетами и лжоулевым разогревом в авроральном овале, а с работой дневного каспа и с событиями в полярной шапке, что было подтверждено Ю.И. Гальпериным измерениями высыпаний мягких электронов в эту уникальную магнитосферную «воронку», что в свою очередь указывает на отсутствие строгой привязки таких ПВ к магнитной буре, также как она напрямую не зависит от РСА..

В работе [5] от 2019 года авторами представлен обстоятельный обзор проблемы по >40 библиографическим источникам. Однако, несмотря даже на наличие совместной работы по этой теме с автором [6], ни в этой, ни в других работах отечественных (например, Д.В. Благовещенский, А.В. Михайлов и мн. др.) и зарубежных исследователей ионосферы (например, L. Liu et al, B.J. Adekoya, J. Laštovička и мн. др.) ссылок на работы [1, 2] нет.

Цели настоящей работы: а) восстановить приоритет открытия; б) показать путь поиска правильного объяснения явления, убрав поначалу как минимум из его дефиниции обязательность термина «предштормоволй», отнеся его не к ионосферно-магнитным, а к термосферно-ионосферным возмущениям с учётом циркуляции, способствующей или препятствующей поступлению дополнительного материала на дневную сторону темосферы.

1.Mirmovich E.G. Ionospheric Behavior during August 2-11, 1972… over Khabarovsk. Report UAG, ЯО.28, WDCenter A, Boulder, Colorado, USA, 1973, part II. PP. 557–561.

2.Мирмович Э.Г. Исследование и прогноз крупномасштабных термосферно-ионосферных возмущений / Автореф. дисс… канд. физ.-мат. наук. Иркутск. 1981. 23 с.

3.Kane R.P. Storm-time variations of F2 // Ann. Geophysicae. V. 29. 1973a. P. 25–42.

4.Kane R.P. // J. Atmos. Terr. Phys. V. 37. 1975. P. 601–611.

5.Данилов А.Д., Мирмович Э.Г., Морозова Л.Д. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагн. и аэрономия. Т.25, №5. 1985. С. 768–772.

6.Константинова А.В., Данилов А.Д. // Гелиогеофиз. исслед., вып. 22. 2019. С. 33–51.

ТЕРМОСФЕРНО-ИОНОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ КАК ОТДЕЛЬНЫЙ КЛАСС ВОЗМУЩЕНИЙ ИОНОСФЕРЫ

Мирмович Э.Г., *к.ф.-м.н., доцент*

ГБПОУ МО «Химкинский техникум», г. Химки, mirmovich1940@mail.ru

Термин «термосферно-ионосферные возмущения» (ТИВ v TID) впервые введен в научный обиход автором в цикле работ 1978–1981 гг. для обозначения возмущений верхней атмосферы, первичным процессом для которых является образование пространственно-временной нерегулярности в составе нейтральной атмосферы, превращаемой последующим воздействием источниками ионизации в возмущение ионосферной плазмы. Все модификации ТИВ-TID выделены автором в отдельный класс, что было защищено диссертацией «Исследование и прогноз термосферно-ионосферных возмущений» в 1981 году [1]. Однако десятки лет почти до настоящего времени этот термин ни у нас, ни за рубежом не был адекватно воспринят. Причиной этого явились два обстоятельства: во-первых, недооценка его как генетически принципиальной альтернативы ионосферно-магнитным возмущениям применением вместо ТИВ-TID термина «термосферно-ионосферное взаимодействие», а во-вторых, автор не сумел донести свою идею до мировой научной общественности через зарубежные издания.

Сама идея выделения ТИВ-TID в отдельный объект исследований и прогноза родилась при расчёте и анализе N(h)-профилей и температуры области F по наземным и спутниковым измерениям [2] в рамках комплексного проекта «Исследования в ионосфере при помощи спутника «Космос-378» (17.11.1970 – 17.08.1975 гг.). Спутниковые данные на высотах > h_m по измерениям зондом Ленгмюра и сферическим зондом В. Афонина показывали неустранимое аппаратурными допусками расхождение с рядом профилей, рассчитанных по ионограммам вертикального зондирования (ВЗИ) на дальневосточных станциях, контролирующих широтный пояс $\Delta\varphi \sim 50 \div 45^{o}$N , а также с профилями модели IRI.

В рамках численных моделей ионосферы, даже лучших из них (например, цикла MSIS – вариант NRLMSISE-00, СибНИГМИ, а также более ранних работ [3, 4] и др.) описать адекватно физические механизмы ТИВ-TID до прогностического применения невозможно – термосферное «цунами» на высотах области F-ионосферы от рождения до диссипации «проживает» свою, не очень зависимую от регулярной ионосферы жизнь. Параметр возмущённости в качестве предиктора задан отдельно в единственной из них – TIEGCM – в виде уровня возмущения O_2. Качественная двухуровневая модель циркуляции в виде ветрового переноса дополнительного материала на h > 200 км (область F), построенная по модифицированной автором модели верхней атмосферы J79 введением в неё утреннего и вечернего электроджетов и дневного каспа в качестве источников [5, 6], показывает, что поступает он, «втягиваясь» в область разрежения плотности из низких, а не высоких широт, откуда по уровню <150 км приходит молекулярный материал в средние широты; в ночное время адвективный перенос ветром дополнительной концентрации нейтралов приводит к росту рекомбинации, а в дневное – к росту ионизации воздействием солнечного УФИ; мелкие девиации-осцилляции Ne в области F, ответственные за F-рассеяние, объяснены воздействием инфразвука [7] от разных (и сейсмических) источников.

Всё это важно не только из-за трудности использования на практике громоздких численных моделей, но в первую очередь – для прогнозирования с привлечением минимума данных ВЗИ ионосферных возмущений и бурь, влияющих на дальнее распространение радиоволн, почти всех видов жизнедеятельности в ближнем космосе, включая работу КА и даже воздействие на баллистику МБР в пассивной части их траектории в период ТИВ-TID.

1. Мирмович Э.Г. Автореф. дис. ... канд. ф.-м. н. Иркутск: СибИЗМИР, 1981. 23 с.
2. Мирмович Э.Г., Шапиро Б.С. // Геомагн. и аэрономия. М.:1975, т.15, № 5. С. 934–938.
3. Prolss G.W. // Rev. Geophys. Space Phys. 1980. V. 18, N. 1, P. 183–202.
4. Fuller-Rowell T.J., Rees D. // J. Atmos. Sci. 1980. V. 37, N. 11, P. 2545–2567.
5. Мирмович Э.Г. / В сб. «Крупномасштабная структура субавроральной ионосферы». Якутск, июнь 1981 г. С. 15–18.
6. Мирмович Э.Г. / XXV НТК, 14–16 апреля 1982. Новосибирск, 1982. С. 23.
7. Мирмович Э.Г. и др. // Геомагн. и аэрономия. 1978, т.18, № 3. С. 535–536.

МОДУЛЯЦИОННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ В ПЛАЗМЕ ЗАПЫЛЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ И В ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ ХВОСТОВ МЕТЕОРОВ

Морозоваа Т.И., Попель С.И.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, timoroz@yandex.ru

Рассмотрено развитие модуляционной неустойчивости с участием пылевых акустических возмущений в плазме запыленной ионосферы Земли и в пылевой плазме хвостов метеоров во время их пролетов. Оценен эффект столкновения электронов, ионов и пылевых частиц с нейтралами на разных высотах. Показано, что в этом случае влияние столкновений электронов и ионов с нейтралами обычно менее существенно, чем влияние столкновений пыли с нейтралами. Показано, что влияние модуляционной неустойчивости на распространение электромагнитных волн в пылевой ионосферной плазме наиболее существенно на высотах 100–120 км. Рассчитаны значения волновых векторов электромагнитной волны накачки, при которых неупругие столкновения с нейтралами следует учитывать для развития модуляционного взаимодействия. Модуляционное взаимодействие в запыленной ионосфере важно для объяснения различных явлений, таких, например, как наземные наблюдения низкочастотных ионосферных радиошумов с частотами ниже 60 Гц. Отсутствие наблюдений низкочастотных ионосферных радиошумов во время таких явлений, как серебристые облака и полярные мезосферные радиоотражения, вызванные наличием пылевой плазмы на высотах 80–95 км, объясняется подавлением развития модуляционной неустойчивости на высотах 80–95 км из-за влияния нейтральных частиц. Обсуждается также роль неупругих столкновений с нейтралами в хвостах метеоров. Показано, что для типичных параметров пылевой плазмы метеорных хвостов такие столкновения не влияют на развитие модуляционной неустойчивости в хвостах метеоров.

ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ ПЛОТНЫХ ОБЛАКОВ ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ АКТИВНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ В БЛИЖНЕМ КОСМОСЕ

Николенко А.С., Гущин М.Е., Коробков С.В., Зудин И.Ю., Гундорин В.И., Стриковский А.В., Айдакина Н.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, nikolenko@ipfran.ru

Представлены результаты экспериментов по инжекции плазменных облаков вдоль и поперек внешнего магнитного поля, созданных малогабаритным импульсным коаксиальным генератором плазмы [1]. Исследования проводились при начальных параметрах (энергия, скорость разлета), соответствующих по параметрам подобия условиям активных экспериментов, таких как Флаксус, North Star [2,3]. Исследования проводились на стенде «Крот», позволяющем исследовать динамику плазменных облаков на масштабах порядка одного метра вдоль и поперек квазиоднородного магнитного поля.

Для исследования параметров плазмы использовался широкий арсенал диагностик, дополняющих друг друга: магнитные индуктивные зонды, СВЧ интерферометр на частоте 37.5 ГГц, электрические зонды, камера с быстрым затвором. Типичные параметры плазмы облака составляют: температура электронов T_e = 4 эВ, концентрация плазмы пушки $n_e \sim 10^{13} - 10^{14}$ см$^{-3}$, начальная скорость V_0 лежит в диапазоне от 10 до 30 км/с.

При инжекции параллельно фоновому магнитному полю, сгусток плазмы расширяется вдоль поля, приобретая веретенообразную форму, скорость переднего края облака возрастает с увеличением индукции фонового магнитного поля, а поперечный размер облака уменьшается. Наблюдаются эффекты, характерные для активных экспериментов, в частности, на поздней стадии облако распадается на нити-сгустки, вытянутые вдоль магнитного поля. При инжекции поперек магнитного поля облако плазмы приобретает форму листа, расширяющегося поперек поля на расстояние более 1 м, характерная толщина листа составляет величину порядка гирорадиуса ионов облака.

Исследованы магнитные возмущения, а именно образование диамагнитной каверны, сопровождающие инжекцию плазмы в вакуум во внешнем магнитном поле величиной 50 – 450 Гс при различных давлениях остаточных газов. Полное вытеснение фонового магнитного поля наблюдалось в экспериментах со значением фонового магнитного поля вплоть до 200 Гс [4].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-29-21018-мк.

1. С.В. Коробков, М.Е. Гущин, В.И. Гундорин, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.В. Стриковский, А.С. Николенко // Письма в ЖТФ 2019. Т.**45**. №5. С. 45.

2. B.G. Gavrilov, A.I. Podgorny, I.M. Podgorny, et al. // Geophysical Research Letters 1999. V.**26**. № 11. P. 1549.

3. R.E. Erlandson, C.I. Meng, P.K. Swaminathan, et al. // Journal of Spacecraft and Rockets 2004. V.**41.** № 4. P. 483.

4. М.Е. Гущин, С.В. Коробков, В.А. Терехин, А.В. Стриковский, В.И. Гундорин, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.С. Николенко // Письма в ЖЭТФ 2018. Т. **108**. № 5-6. С. 416.

МЕТОД ОЦЕНКИ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ В ОБЛАСТИ F_2 ИОНОСФЕРЫ БЕЗ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ

Потапов А.С., Полюшкина Т.Н.

ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru

Частотные параметры излучения ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) демонстрируют тесную связь с критической частотой слоя F_2 ионосферы, следовательно, и с электронной плотностью. Однако для использования этой связи в диагностических целях она слишком нестабильна: ее параметры могут меняться ото дня ко дню. Поэтому мы предложили использовать многофакторный регрессионный анализ с включением в него в качестве предикторов дополнительных факторов, отражающих состояние ионосферы. Такими предикторами являются прогнозы величины f_0F_2 и минимума альвеновской скорости по модели IRI-2012, местное время, сезон и индекс авроральной активности AE. При этом основным предиктором служит частотный масштаб излучения ИАР, то есть, расстояние между его соседними гармониками. Коэффициенты множественной регрессии были вычислены на обучающей выборке из 100 часовых значений и тестированы на контрольной выборке размером 45 часовых измерений [1]. Результаты показывают, что использование предложенного метода оценки электронной плотности с использованием многофакторного анализа дает среднеквадратичную ошибку, в 1.65 раза меньшую по сравнению с ошибкой оценки на основе модели IRI-2012 без привлечения данных о частоте ИАР: 3100 против 5100 см$^{-3}$ при типичном диапазоне электронной концентрации 10^5–10^6 см$^{-3}$.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-05-00574.

1. Potapov A.S., Polyushkina T.N. // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2020. V. **58**. P. 5058.

ИОНОСФЕРНЫЙ АЛЬВЕНОВСКИЙ РЕЗОНАТОР: ТРИ ТИПА МОДУЛЯЦИИ ЧАСТОТЫ

Потапов А.С., Полюшкина Т.Н.

ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru

Ионосферный альвеновский резонатор (ИАР) представляет собой полость между основанием ионосферы и областью перехода к магнитосфере. ИАР является неотъемлемым элементом всей ионосферно-магнитосферной структуры. Впервые он был обнаружен П. Беляевым [1] и затем интенсивно изучался многими авторами. На материале данных наблюдений за 24-й солнечный цикл мы рассмотрели три различных типа периодических изменений частоты многополосного излучения ИАР (0.2–10 Гц): суточную, сезонную и солнечно-циклическую модуляцию частоты (рис. 1) [2]. Все три типа модуляции обусловлены вариациями свойств ионосферы в течение суток, года или солнечного цикла, соответственно. Хорошо известна и наиболее ярко выражена суточная модуляция, проявляющаяся в изменении частоты всех гармоник излучения на протяжении суток — от минимума вблизи местного полудня до максимальных значений в период от полуночи до ранних утренних часов. Менее известна сезонная модуляция средней частоты излучения ИАР — от минимума летом до максимума в зимние месяцы. При этом глубина суточной модуляции частоты меняется в течение года, но противофазно частоте: минимум зимой, а максимум летом. Мы выявили также четкую модуляцию частоты ИАР в цикле солнечной активности: среднегодовая частота обратно пропорциональна среднегодовому числу солнечных пятен с коэффициентом корреляции 0.99.

Суточная модуляция частоты почти полностью объясняется зависимостью частоты от электронной концентрации в области F_2 ионосферы, что позволяет использовать ее в качестве основного предиктора этого ионосферного параметра [3]. Зависимости частоты от сезона и солнечного цикла имеют более сложную природу. Есть основания предполагать, что в их формировании большую роль играют изменения ионного состава ионосферы, в первую очередь, в верхней ее части. Это открывает возможности наземной диагностики высотного профиля относительной концентрации ионов по измерениям частотной структуры излучения ИАР [4].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-05-00574.

1. Belyaev P.P. et al. // Radiophys. Quantum Electron. 1989. V. **32**. P. 594.
2. Potapov A.S., Polyushkina T.N. // AIMS Geosciences. 2020. V. **6**. P. 545.
3. Potapov A.S., Polyushkina T.N. // IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing. 2020. V. **58**. P. 5058.
4. Потапов А.С. и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли. 2016. Т. **13**. С. 192.

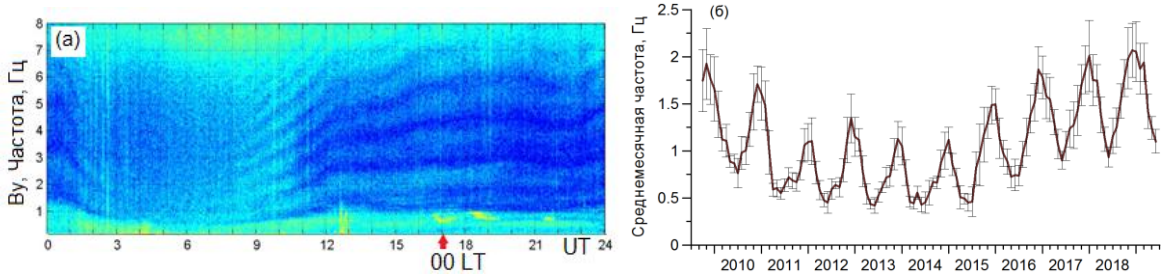


Рис. 1. Спектрограмма излучения, демонстрирующая суточную модуляцию частоты (а); циклическая вариация среднемесячных значений частоты ИАР, видна отчетливая сезонная модуляция (б).

ГНСС ПРИЕМНИК НА БАЗЕ МОДУЛЯ U-BLOX ZEDF9P: РАЗРАБОТКА МАКЕТА, ТЕСТИРОВАНИЕ, ВАЛИДАЦИЯ ДАННЫХ

Когогин Д. А. [1], Соколов А.В. [1], Шиндин А. В. [2], Рябов А.В. [2], Насыров И.А. [1], Максимов Д.С. [1], Загретдинов Р. В. [1]

[1] *КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com*

[2] *ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия,*

Активно развивающаяся в настоящее время отрасль воздушных и наземных беспилотных средств становится важным драйвером развития высокоточного позиционирования с субсантиметровой и большей точностью. Специфика отрасли накладывает на устройства, обеспечивающие такую точность позиционирования ряд дополнительных требований: малогабаритность, энергоэффективность и низкая стоимость относительно профессиональных геодезических решений. Для научных исследователей такое положение дел в индустрии открывает новые возможности в области мониторинга верхней атмосферы сигналами ГНСС, так как для обеспечения высокой точности позиционирования описанные выше устройства обладают возможностью параллельного приема сигналов во всем частотном диапазоне (1176–1610 МГц) основных ГНСС созвездий (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, QZSS), что позволяет проводить исследование ионосферы с помощью измерений ПЭС и индексов ионосферной активности, рассчитанных на основе его. Одним из первых представленных, в данном классе устройств, является ГНСС модуль ZED-F9P от компании u-blox. Невысокая стоимость отладочных плат на его базе (200-250 $) открывает широкие возможности для разработки бюджетных мобильных ГНСС приемников.

В докладе представлены результаты разработки макета ГНСС приемника на основе модуля u-blox ZED-F9P и предварительного анализа данных ГНСС радиозондирования, полученных с его помощью, а также сравнение его характеристик с профессиональным геодезическим ГНСС приемником Trimble Alloy (станция KZN2 сети IGS) и смартфоном Xiaomi Mi 8 с двухчастотным ГНСС модулем BCM47755. Макет устройства состоит из трех основных элементов: отладочной платы simpleRTK2B, одноплатного компьютера Raspberry Pi и бюджетной ГНСС антенны BEITIAN BT-290. Настройка, управление и запись «сырых» данных (в том числе RINEX) осуществляется при помощи Raspberry Pi с использованием оригинального программного обеспечения на языке Python. Первые тестовые измерения, проведенные 30.04.2020 г. по выборке из 14 спутников в интервале 18:00÷19:00 UTC, показали, что медианное значение отношения сигнал/шум на частоте L1 для станции KZN2 составляет 48,75 дБГц, для разработанного приемника 45 дБГц. Разница составляет 8%. Значение параметра ROTI на разработанном приемнике на 30 % выше чем на станции KZN2. В тоже время сравнение разработанного ГНСС приемника с сопоставимым по стоимости смартфоном Xiaomi Mi 8 показывает, что медианное значение отношения сигнал/шум на частоте L1 для смартфона равно 40,6 дБГц, что на 10 % ниже данного параметра для ГНСС приемника на модуле u-blox ZED-F9P, на частоте L5 данная разница увеличивается до 15%. Значение параметра ROTI на смартфоне на 57 % выше, чем на разработанном ГНСС приемнике. На текущем этапе разработки возможности приемника позволяют вести регистрацию данных с частотой до 5 Гц без каких-либо ограничений. Для более высоких частот регистрации данных (5÷20 Гц) предварительно необходимо ввести ограничения по количеству ГНСС созвездий и/или углу возвышения. В настоящий момент 2 макета ГНСС приемника введены в постоянную эксплуатацию в КФУ и ННГУ.

Разработка и создание макета ГНСС приемника на базе модуля u-blox ZED-F9P выполнены при поддержке РФФИ (№ 20-32-70198). Проведение эксперимента, обработка и интерпретация полученных данных, включая визуализацию результатов и подготовку доклада выполнены при финансовой поддержке РНФ (№ 19-72-00072).

ЛАБОРАТОРНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СТРИМЕРНЫХ РАЗРЯДОВ

[1]Сысоев В.С., [1]Сухаревский Д.И., [1]Орлов А.И., [1]Наумова М.Ю., [1]Кузнецов Ю.А., [1]Швец Н.Н., [1]Лепехин Н.М., [2]Гущин М.Е., [2]Коробков С.В., [2]Зудин И.Ю., [2]Николенко А.С., [2]Микрюков П.А., [2]Айдакина Н.А., [2]Белов А.С.

[1] *РФЯЦ ВНИИТФ ВНИЦ 900, Истра, Россия, v.s.sysoev@vniitf.ru*

[2] *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Измерения радиоизлучения стримеров в СВЧ диапазоне представляют значительный интерес, поскольку именно со стримерных разрядов начинается зарождение и развитие молнии. При грозовой активности атмосферы СВЧ излучение стримеров дает существенный вклад в сигнал помехи, мешающей нормальной работе устройствам сетей сотовой и космической связи, радиолокаторам. Поэтому исследование спектра излучений от стримеров в области СВЧ (1÷20 ГГц) могут быть полезны, например, при разработке мер защиты аппаратуры связи от электромагнитных помех.

Измерения выполнялись на специальном стенде, созданном для изучения стримерного разряда[1]. Стенд позволяет получать стримерные разряды длиной до 20 см в частотно-импульсном режиме. Приведены результаты измерений излучений в области СВЧ при частоте чередования импульсов 500 Гц. СВЧ сигнал, возбуждаемый стримерным разрядом, принимался на растоянии 2,5 м рупорной антенной JXTX LB-20180-SF с рабочей полосой частот от 2 до 18 ГГц и регистрировался осциллографом Tektronix DPO 72304 с шагом дискретизации 10 пс при полосе пропускания 23 ГГц. Запуск осциллографа осуществлялся по фронту принимаемого СВЧ сигнала. Одновременно синхронно регистрировались напряженности электрического и магнитного полей специальными датчиками, позволяющими также измерять поляризацию излучения.

Полученные спектрограммы сигналов демонстрируют особенности. Спектр излучения простирается, как минимум, до 18 ГГц и зависит от амплитуды и крутизны тока в разрядном промежутке (стримере). Максимальная интенсивность сигнала достигается в начале импульса, либо спустя несколько десятков наносекунд, затем она плавно уменьшается. Начало основного импульса характеризуется резким увеличением амплитуды и расширением спектра. Получена заависимость полной энергии СВЧ излучения, принимаемого рупором, от приложенного напряжения (тока в разряде). При этом энергия СВЧ импульсов с увеличением напряжения (тока) нарастает по степенному закону.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00501).

1. Сысоев В.С., Кузнецов Ю.А., Булатов М.У. и др. // XIII Международная конференция «Забабахинские научные чтения», 20÷24 марта 2017, г. Снежинск, Челябинская область, РФ, Тезисы З-42, с.145÷146.

ЭЛЕКТРОННАЯ КИНЕТИКА МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА И МОЛЕКУЛЯРНОГО КИСЛОРОДА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ ВЫСЫПАНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ

Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б.

ПГИ, г. Апатиты, Мурманская область, Россия, kirillov@pgia.ru

Одним из индикаторов состояния атмосферы Земли является ее свечение. Поскольку молекулярный азот доминирует в составе атмосферы Земли, спектры свечения должны содержать множество полос азота. В предыдущих работах [1-3] были проведены расчеты профилей скоростей свечения полос первой (1PG) и второй положительных (2PG) систем, полос Лаймана-Бирджа-Хопфилда (LBH) молекулярного азота, обусловленных спонтанными излучательными переходами между электронно-возбужденными состояниями

$N_2(B^3\Pi_g,v) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+,v') + h\nu_{1PG}$,

$N_2(C^3\Pi_u,v) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g,v') + h\nu_{2PG}$,

$N_2(a^1\Pi_g,v) \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+,v') + h\nu_{LBH}$

на разных высотах верхней и средней атмосферы во время вторжения в атмосферу высокоэнергичных электронов (с энергиями от 10 кэВ до 10 МэВ).

В настоящей работе рассмотрена кинетика триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) состояний молекулярного азота и синглетных ($a^1\Delta_g$, $b^1\Sigma_g^+$) состояний молекулярного кислорода на высотах средней атмосферы во время вторжения высокоэнергичных протонов. При этом были учтены процессы прямого электронного возбуждения

$e + N_2(X^1\Sigma_g^+,v=0) \rightarrow e + N_2(A^3\Sigma_u^+, B^3\Pi_g, W^3\Delta_u, B'^3\Sigma_u^-, C^3\Pi_u,v)$,

$e + O_2(X^3\Sigma_g^-,v=0) \rightarrow e + O_2(a^1\Delta_g, b^1\Sigma_g^+,v)$,

вторгающимися в атмосферу высокоэнергичными протонами и вторичными электронами, процессы спонтанного излучения, а также перенос энергии возбуждения молекул между электронно-возбужденными состояниями N_2 и O_2 при молекулярных столкновениях. Константы скоростей переноса энергии возбуждения между электронно-возбужденными состояниями молекулярного азота и кислорода при столкновениях с молекулами N_2 и O_2 были теоретически рассчитаны согласно квантово-химическим приближениям [4-7]. Впервые рассмотрена кинетика синглетных состояний O_2 на высотах средней атмосферы как с учетом прямого возбуждения высокоэнергичными протонами и вторичными электронами, так и с учетом процессов переноса электронного возбуждения с метастабильного молекулярного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+,v=0)$ на состояния Герцберга O_2 и перераспределения энергии возбуждения между колебательными уровнями синглетных состояний при неупругих молекулярных столкновениях. Показано, что доминирующий вклад в возбуждение $O_2(a^1\Delta_g)$ и $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ вносят процессы прямого электронного возбуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 18-77-10018).

1. Kirillov A.S., Belakhovsky V.B. 2019, Geophys. Res. Lett., v.46, p.7734-7743.
2. Кириллов А.С., Белаховский В.Б., 2020, Геомаг. Аэрон., т.60, №1, с.93-98.
3. Кириллов А.С., Белаховский В.Б., 2020, Геомаг. Аэрон., т.60, №6, с.796-802.
4. Kirillov A.S., 2008, Ann. Geophys., v.26, №5, p.1149-1157.
5. Kirillov A.S., 2010, Ann. Geophys., v.28, №1, p.181-192.
6. Kirillov A.S., 2011, J. Quant. Spec. Rad. Trans., v.112, p.2164-2174.
7. Кириллов А.С., 2012, Квант. Элек., т.42, №7, с.653-658.

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ В ОБЛАСТИ СВЧ ИЗ ЗАРЯЖЕННОЙ АЭРОЗОЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ГРОЗОВУЮ ЯЧЕЙКУ

[1]Сысоев В.С., [1]Сухаревский Д.И., [1]Орлов А.И., [1]Наумова М.Ю., [1]Кузнецов Ю.А., [1]Швец Н.Н., [2]Гущин М.Е., [2]Коробков С.В., [2]Зудин И.Ю., [2]Мареев Е.А., [2]Николенко А.С., [2]Микрюков П.А., [2]Айдакина Н.А., [2]Белов А.С.

[1] *РФЯЦ ВНИИТФ ВНИЦ 900, Истра, Россия, v.s.sysoev@vniitf.ru*

[2] *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Исследования в области генерации ВЧ и СВЧ излучений молниями проводятся давно. Но продолжают представлять значительный интерес как для решения задач физики молнии, так и для различных приложений, например, связанных с созданием систем грозопеленгации, устройств высокочастотной связи. Проведение таких исследований в лабораторных условиях стало возможным после появления установок, позволяющих проводить физическое моделирование грозовых ячеек на основе генераторов сильно заряженных водных аэрозолей [1]. При этом создаются заряженные аэрозольные области с размером в несколько кубических метров и с потенциалом порядка 1МВ. Такие заряженные структуры могут генерировать искровые разряды длиной до 2 м.

В работе представлены результаты измерений радиоизлучений при развитии искрового разряда из такого заряженного облака сильнозаряженных водяных капель, моделирующего грозовую ячейку. Впервые измерены параметры сверхширокополосных электромагнитных импульсов (UWB EMP) разных стадий искровых разрядов (аналогичных при развитии молнии) в частотной полосе до 10 GHz. Получено, что электромагнитные импульсы излучения с характерными длительностями нарастания фронта от 70 до 500 ps возникают при встрече стримерных корон от отрицательного лидера, развивающегося с отрицательного облака и положительного лидера с заземленной плоскости, а также в стадии обратного удара. Измерены значения электрических и магнитных полей UWB EMP, определена поляризация излучений. Экспериментально полученные в работе данные о волновых формах и спектрах UWB EMP согласуются с теоретическими представлениями о таких разрядных процессах, изложенных в последних публикациях [2].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-19-00501).

1. Басиев Т.С., Верещагин И.П., Макальский Л.М. и др.// Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1982. №5, С.118-127.
2. F. Shi, N. Liu, J.R. Dwyer, K.M.A. Ihaddadene. // Geophysical Research Letters, V. 46, (2019), https://doi.org/10.1029/2018GL080309.

РАСЧЕТ ОЦЕНКИ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РЕЖИМЕ ТЕКУЩЕГО ВРЕМЕНИ НА ОСНОВАНИИ АНАЛИЗА СТАТИСТИКИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРЫ

[1]Коган Л.П., [2]Бубукин И.Т., [1]Штенберг В.Б.

[1]*ННГАСУ, г. Нижний Новгород, Россия, L_kog@list.ru* , [2]*ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия*

В работе предлагается методика вычисления оценки для вероятности землетрясений магнитуды 5.5+ на основании исследования статистики значений критической частоты (КЧ) ионосферы. Апробация методики проведена по измерениям, осуществленным в 1994–2004 гг. на ионозонде Петропавловск около г. Петропавловск-Камчатский. При расчетах применялся статистический функционал $L(n) = \frac{A}{M}\sum_{l=n-M+1}^{n}|L_l|$, $L_l = \sum_{m=0}^{N-1}(-1)^m P_{l,m}$ [1, 2]. Здесь $M = 101$, $A = 1010$, $P_{l,m}$ есть вероятность попадания значений случайной величины (СВ) $\sin(x)$ (здесь x – измеренные значения КЧ в мегагерцах) в интервал $[-1 + mh; -1 + (m+1)h]$, где $0 \le m \le N-1$, $h = 0.01$ и $N = 200$. Индекс $l \in [n - M + 1, n]$ – номер отрезка реализации протяженностью 24 часа, включающего (при отсутствии сбоев) 96 измерений КЧ. Аргумент n равен числу суток непрерывной работы ионозонда.

Зависимости $L(n)$ сопоставлялись моменты времени землетрясений магнитудой 5.5+ (при условии отсутствия перед ними таких событий в течение предшествующих 14 суток), зафиксированных в 1994-2004 гг. в области радиусом 1000 км от данного ионозонда. В результате был выявлен эффект дискретизации значений $L(n)$, состоящий в формировании групп землетрясений (назовем их сериями), которым отвечают значения $L(n) \in [L_j(1-\alpha), L_j(1+\alpha)]$, $j = 1, 2, \ldots 15$ (такие отрезки области значений $L(n)$ обозначим как D_j). Здесь L_j – значение $L(n)$ в момент n_j первого события j-й серии и $\alpha = 0.013$. К указанным 15 сериям принадлежит 85% рассматриваемых событий. С учетом феномена подобного «сейсмического квантования» рассмотрим ансамбль интервалов времени между последовательными землетрясениями во всех этих сериях. Обозначим $\Delta n = \nu_{\text{int}} + \sigma_{\text{int}}$ (здесь ν_{int} и σ_{int} – среднее значение и соответственно среднее квадратичное отклонение для такого ансамбля), l_j – длительность серии j, τ – время, отсчитываемое от последнего относящегося к ней события и P_1 – вероятность землетрясения при попадании точки $T_n = \{n, L(n)\}$ в какую-либо область вида $L(n) \in D_j$, $n \in [n_j, n_j + l_j]$. Тогда при условии $L(n) \in D_j$ и $n > n_j + l_j$ (назовем эти области Ω_j, а их совокупность обозначим Ω) на основании неравенства Чебышева приходим к оценке сверху $P_{upp}(j,\tau)$ для вероятности $P(j,\tau)$ землетрясения в текущий момент времени

$$P_{upp}(j,\tau) = P_1\,\frac{l_j}{l_j+\tau}\,,\ 0 < \tau < \Delta n;\quad P_{upp}(j,\tau) = P_1\frac{\sigma_{\text{int}}^2\, l_j}{(\tau-\nu_{\text{int}})^2(l_j+\tau)}, \tau \ge \Delta n\,.$$

Для «одиночных» землетрясений (отвечающие им значения $L(n) \notin D_j$ при всех j; совокупность соответствующих областей вида Ω_j назовем Ω') значение l_j везде заменяем на Δn. Предлагаемая оценка снизу $P_{low}(j,\tau) = P_1 \nu_{int}^{-1}\exp(-\tau/\nu_{int})\int_0^\infty \exp(-\zeta/\nu_{int}) l_j/(l_j+\zeta)d\zeta$ для $P(j,\tau)$ соответствует рассмотрению моментов землетрясений как простейшего пуассоновского потока. Медианная оценка для $P(j,\tau)$ может быть записана как $P_{med}(j,\tau) = [P_{upp}(j,\tau) + P_{low}(j,\tau)]/2$. При $T_n \notin \Omega + \Omega'$ вероятность землетрясения $\mathcal{P} \ll P_1$.

Применение результатов вычислений к указанной выше области Камчатского региона позволило, в частности, выделить совокупность интервалов времени со значительно, в три и более раза, повышенной вероятностью сильных землетрясений. Полученные результаты и их возможное феноменологическое объяснение были приведены в работе, направленной в журнал «Chaos, Solitons & Fractals».

[1] Коган Л. П. // Геомагнетизм и аэрономия 2015. Т. **55(**4). С. 525.
[2] Коган Л.П., Кислицын Д.И., Красникова О.В., Медяник И.А., Гордецов А.С. // Современные технологии в медицине 2017. Т. **9**(4). С. 25.

ЗАВИСИМОСТЬ ПОЯВЛЯЕМОСТИ ДНЕВНЫХ СРЕДНЕШИРОТНЫХ МЕЛКО- И СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ ПИВ ОТ НАПРАВЛЕНИЯ ММП

Акчурин А.Д., Смирнов Г.С., Ильдиряков В.Р.

К(П)ФУ, г. Казань, Россия, adel.akchurin@kpfu.ru

На ионограммах вертикального зондирования сигнатуры среднеширотных ПИВ среднего (с горизонтальными размерами 100-500 км) и малого масштабов несколько различаются. Если для СМ ПИВ – это перемещение частей касповой дуги основного слоя, и в первую очередь, той, что вблизи критической частоты, то для ММ ПИВ – это появление дополнительных следов серповидной или клювообразной формы (в англоязычной терминологии cusps и hooks, соответственно) и опять же, вблизи критической частоты. В силу большой вариативности сигнатур ММ ПИВ на ионограммах и их малого времени присутствия (5-8 минут) для обнаружения ММ ПИВ на нашем ионозонде использовался косвенный подход – анализ изменения кривизны хвостовой части следа F слоя (конца его касповой дуги). Использование вариации кривизны касповой дуги слоя F как прокси-индикатора ММ ПИВ оказалось вполне оправданным, т.к. позволило автоматизировать обработку многочисленных одноминутных ионограмм [1, 2]. При такой автоматической обработке, как оказалось, можно обрабатывать СМ и ММ ПИВ одновременно не решая задачу их разделения, т.к. эта различие между сигнатурами ММ ПИВ и слабых СМ ПИВ (с $dN/N < 10\%$) часто достаточно условно. Обработка такой смеси среднеширотных СМ и ММ ПИВ малоисследована весьма важна для изучения происхождения таких ПИВ. В настоящий момент непрерывно регистрировать такие слабые или мелкомасштабные ПИВ под силу лишь ионозондам с минутным съемом ионограмм.

Уже первая обработка появления таких СМ и ММ ПИВ показала, что они имеют склонность к опережающему циклическому появлению в дневной ионосфере, т.е. ряд ПИВ, похожих по сигнатуре, появлялись ежедневно во все более раннее время, по отношению к предыдущему дню. Это ежесуточное опережение (или сверхкоротация/сверхротация) появления ПИВ с одинаковой сигнатурой находилось в интервале (4-7 минут).

Для того, чтобы детализировать особенности такой сверхкоротации появления ПИВ был применен вейвлет анализ, детали которого приведены в предыдущей работе [2]. При обработке времен появления СМ и ММ ПИВ мы также обратили на некоторую зависимость частоты их появления от некоторых компонент направления межпланетного магнитного поля. Никакой связи с традиционной для исследователей магнитных бурь B_z компонентой не было найдено. Не была найдена зависимость от конусного угла ($\arccos(|B_x|/B_{total})$), часто используемого в исследованиях авроры на дневной стороне [3]. Более продуктивным стал совместный анализ частоты появления ПИВ и ориентации ММП по линиям спирали Паркера ($B_x > 0$, $B_y < 0$) (ориентация «по Паркеру») и перпендикулярно линиям спирали Паркера ($B_x > 0$, $B_y > 0$) (ориентация «по анти-Паркеру». Такой оказался более продуктивным, как и в [4]. А именно, частота появления дневных СМ и ММ ПИВ усиливается примерно в два раза при ориентации ММП «по анти-Паркеру». Этот факт нуждается в дальнейшем исследовании, т.к. не может быть объяснен только с точки зрения воздействия нижнеатмосферных ВГВ, как основной причины образования среднеширотных дневных ПИВ.

1. Akchurin A., Smirnov G. // Proc. of 32nd URSI GASS 2017. Art. 8105046. doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8105046.
2. Акчурин А.Д., Смирнов Г.С. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки 2019. Т. **161**. С. 468. doi: 10.26907/2541-7746.2019.3.468-480.
3. Han D.-S. et al. // J. Geophys. Res. 2017. V. **122**. P. 1853. doi:10.1002/2016JA023394.
4. Gillies D.M. et al. // J. Geophys. Res. 2014. V. **119**. P. 2550. doi:10.1002/2013JA019469.

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ ВОЛНОЙ ЦУНАМИ

Сорокин В.М., Ященко А.К.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, sova@izmiran.ru

Многочисленные наблюдения показывают, что появление цунами сопровождается генерацией возмущения геомагнитного поля как на океанском дне в районе распространения волны, так и на берегу на значительном расстоянии от морской среды. Эти данные дали возможность определить направление распространения волны цунами. Проведенный анализ показал, что волны цунами амплитудой (0.1 – 1) м сопровождаются возмущением магнитного поля, достигающим величины (1 – 10) нТл на поверхности океана. Кроме того обнаружено, что распространение волны цунами сопровождается генерацией акустико-гравитационной волны (АГВ) и появлением ионосферных возмущений. Механизм генерации магнитного поля основан на формировании электрического тока волной цунами в океане и в ионосфере. Источником тока в морской среде является ее движение в геомагнитном поле. Источником тока в ионосфере является ее движение под действием акустико-гравитационной волны в геомагнитном поле. Величины электрического тока в морской среде и в ионосфере сравнимы в результате экспоненциального роста АГВ при ее распространении вверх.

В работе выведены уравнения и разработан метод расчета пространственно-временного распределения возмущения геомагнитного поля в системе океан – атмосфера - ионосфера в наклонном геомагнитном поле низких и средних широт при распространении цунами под произвольным углом к геомагнитному меридиану. Получено выражение для ионосферного и продольного токов с учетом сопряженной ионосферы, которые возникают при распространении АГВ вверх в результате вертикального смещения поверхности океана в волне цунами.

Показано, что пространственная форма возмущения магнитного поля на поверхности морской среды мало меняется в зависимости от угла наклонения геомагнитного поля и направления распространения волны относительно геомагнитного меридиана. Горизонтальная компонента магнитного поля меняет полярность в зависимости от координаты, в то время как вертикальная компонента остается однополярной. Амплитуда горизонтальной компоненты магнитного возмущения возрастает с ростом широты при распространении вдоль геомагнитного меридиана. Амплитуда и горизонтальный размер возмущения возрастает в зависимости от увеличения угла распространения относительно магнитного меридиана для фиксированного угла наклонения геомагнитного поля. Возмущение магнитного поля в ионосфере имеет три компоненты в отличие от двух компонент в морской среде. С ростом угла наклонения геомагнитного поля амплитуда возмущения, как правило, возрастает как на поверхности морской среды, так и в ионосфере. Амплитуда возмущений в ионосфере может существенно превосходить амплитуду на поверхности морской среды. Этот факт свидетельствует о принципиальной роли электрического тока в ионосфере в генерации возмущения магнитного поля волной цунами. Величина магнитного поля в ионосфере тока, текущего в морской среде, стремится к нулю с высотой. Величина магнитного поля суммы токов, протекающих в морской среде и в ионосфере, стремится к постоянному значению с ростом высоты. Такой характер высотной зависимости магнитного поля в ионосфере обусловлен наличием продольного тока, текущего в сопряженную область ионосферы. Возмущение магнитного поля в ионосфере локализуется в окрестности продольного тока. Регистрация электромагнитных возмущений в ионосфере может быть использована для мониторинга волны цунами спутниковыми методами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01201356396 при частичной поддержке РФФИ-ГФЕН в рамках гранта №21-55-53053.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ И МАГНИТОСФЕРНЫХ ПРОТОНОВ НА ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЫ

Клименко М.В. 1,2, Бессараб Ф.С. 1, Суходолов Т.В. 2,3, Клименко В.В. 1, Розанов Е.В. 2,3

1 КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия, mvklimenko@wdizmiran.ru

2 СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

3 Physikalisch-Meteorologisches Observatorium, World Radiation Center, Davos, Switzerland

В данной работе представлены результаты исследования отклика параметров системы термофера-ионосфера на Солнечные Протонные События (СПС) и высыпания магнитосферных протонов. Известно, что основная часть энергии протонов поглощается значительно ниже F и E областей ионосферы, поэтому и прямой эффект от СПС в параметрах ионосферы должен быть невелик. К тому же протонные события и значительные высыпания магнитосферных протонов происходят на фоне геомагнитных возмущений, которые значительно воздействует на ионосферу и тем самым маскируют ионосферные эффекты солнечных и магнитосферных протонов в данных наблюдений. Эффективное исследование подобных явлений возможно лишь с использованием самосогласованных моделей системы атмосфера-ионосфера. Наше исследование было выполнено с помощью недавно созданной модели всей атмосферы EAGLE (Entire Atmosphere GLobal model). Характеристики потоков солнечных протонов и скорости ионизации от них рассчитывались с помощью модели AIMOS (Atmospheric Ionization Module Osnabrück). Численные эксперименты проводились для января 2005 г. и сентября 2017 г. во время которых наблюдались СПС типа Ground Level Enhancement (GLE). Причем, СПС 20 января 2005 года было самым мощным за последние более чем 50 лет, произошедших после GLE 23 февраля 1956 г. В процессе одного из вариантов расчетов изменялись характеристики только протонных потоков, все остальные входные параметры модели EAGLE, в том числе параметры электронных высыпаний, соответствовали спокойным условиям. Несмотря на относительную прозрачность верхней атмосферы для протонов высоких энергий, в численных экспериментах был получен ионосферный отклик на усиление протонных высыпаний из хвоста магнитосферы и СПС. В E области ионосферы максимальное увеличение электронной концентрации локализовано вблизи полюсов и ограничено широтными кругами ± 60°, а на высотах F2 слоя ионосферы положительные возмущения формируются в низкоширотной области. Анализ полученных модельных результатов показал, что изменения в F2 слое ионосферы произошли вследствие генерации динамических процессов в мезосфере и нижней термосфере, которые вызвали направленный к экватору перенос атомарного кислорода, и, в конечном итоге, рост электронной концентрации в F области ионосферы. Мы показали, что на фазе восстановления после СПС полное электронное содержание и плотность электронов в области F и в верхней ионосфере/плазмосфере на низких и средних широтах растет в связи с увеличением концентрации атомного кислорода. Подобный положительный ионосферный эффект последействия существует и после геомагнитных бурь и стратосферных потеплений. Основные отличия возмущений NmF2 и ПЭС в одном регионе связаны в основном с возмущениями электронной температуры, оказывающими существенное влияние на возмущения полного электронного содержания.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (№ 18-55-52006) и Российского Научного Фонда (20-67-46016).

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЫСЫПАЮЩИХСЯ ЧАСТИЦ

Яковчук О.С.[1,2,3], Виссинг Я.М.[1]

[1]*Университет Ростока, г. Росток, Германия; olesya@ionization.de*

[2]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия*

[3]*СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия*

В данной работе мы даём эмпирическую оценку размера полярной шапки, как области однородного потока высыпающихся частиц, с использованием космических аппаратов NOAA POES за период с 2001 по 2018 гг. В нашем определении размер полярной шапки однородного потока зависит от вида частиц, энергии и геомагнитных возмущений, а также от местного магнитного времени.

Основные выводы: а) отсутствие однородного потока для частиц с энергией ниже 6.5 кэВ; б) все каналы с более высокой энергией показали наличие области однородного потока высыпающихся частиц; в) небольшие полушарные различия; г) размер области полярной шапки однородного потока высыпающихся частиц зависит от их энергии: увеличивается с энергией протонов, без явной зависимости для электронов; д) влияние геомагнитного возмущения на размер области однородного потока высыпающихся частиц двоякое: протоны с низкой энергией и все электронные каналы показывают отрицательную корреляцию с Kp, тогда как все протоны с высокой энергией показывают положительную (и возрастающую) зависимость. Протоны средней энергии не показывают значительной зависимости от Kp. е) В то время как центр области полярной шапки однородного потока совмещен с геомагнитным полюсом для частиц с низкой энергией, он перемещается к полуночному сектору для протонов с высокой энергией. ж) Сравнение с другими исследованиями показывает, что протоны 240-800 кэВ могут быть ответственны за полярную границу сияния в ультрафиолетовом диапазоне.

Данные доступны в качестве вспомогательного материала в модифицированных координатах APEX 110 км (на основе IGRF и аналогичных координатам AACGM) и, таким образом, могут быть преобразованы в географические координаты для произвольных моментов времени. Результаты нашего исследования можно использовать как инструмент для определения области полярной шапки в моделях высыпания частиц.

Работа выполнена при поддержке гранта немецкого научного фонда (DFG WI4417/2-1).

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ОНЧ ВОЛН В УСЛОВИЯХ ГОРИЗОНТАЛЬНО НЕОДНОРОДНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В.

ПГИ, г. Апатиты, Россия, akhmetov@pgia.ru

Исследования радио сигналов диапазона очень низких частот (ОНЧ) не теряют актуальность в течении многих лет. Первоначально данный диапазон представлял интерес с точки зрения связи и навигации особенно в условиях возмущений электронной плотности в нижней ионосфере, а в последнее время появились работы наоборот использующие сигналы диапазона ОНЧ для получения дополнительных сведений о состоянии ионосферы на пути их распространения. Использование антропогенных стабильных постоянно действующих источников радиосигнала таких как радиотехническая система дальней навигации РСДН-20 «Альфа», в сравнении со случайными сигналами естественной природы, делает задачу исследования нижней ионосферы по результатам наземной регистрации сигналов ОНЧ несколько проще. Однако, сложность интерпретации зарегистрированных амплитудных и фазовых характеристик сигналов с точки зрения влияния на них параметров нижней ионосферы значительно ограничивает такой метод исследования ионосферы. Современные методы численного моделирования распространения радиосигналов в сложных анизотропных средах, а именно такой средой является ионосфера, позволяют получить свободные от влияния посторонних факторов изменения амплитудных и фазовых характеристик обусловленные изменениями профилей электронной концентрации в D и частично в E областях ионосферы.

В работе представлены результаты моделирования распространения электромагнитных волн ОНЧ диапазона в горизонтально неоднородных участках высокоширотного волновода Земля-ионосфера при различных профилях концентрации электронов. Используемые профили концентрации электронов и частоты столкновений электронов с нейтралами соответствовали условиям суббури (событие 24 января 2012 года), приходу межпланетной ударной волны к ионосфере и спокойным условиям. Частоты модельных источников сигнала соответствовали частотам навигационной системы «Альфа» постоянно вещающей в диапазоне ОНЧ на территории Российской Федерации. Полученные в результате численных расчетов данные о амплитудах и фазах сигналов, распространяющихся в участках волновода Земля-ионосфера при различных горизонтально неоднородных профилях концентрации электронов и частоты столкновений электронов с нейтралами, будут полезны для интерпретации зарегистрированных амплитудных и фазовых характеристик сигналов радиотехническая система дальней навигации РСДН-20 с точки зрения влияния на них параметров нижней ионосферы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018).

ЭФФЕКТЫ АСИММЕТРИИ КОНВЕКТИВНОГО ДРЕЙФА ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ГРАНИЦЕ ПОЛЯРНОЙ ШАПКИ

Лукьянова Р.Ю., Козловский А.Е.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, renata@aari.ru

Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

Межполушарная и внутриполушарная асимметрия в распределении ионосферных параметров обусловлена как наклоном земного диполя, так и воздействием солнечного ветра, в частности, азимутальной компоненты межпланетного магнитного поля (By ММП). В работе представлены численные оценки эффектов асимметрии в высокоширотной ионосфере. На основе анализа большого массива данных измерений европейского радара некогерентного рассеяния EISCAT на Шпицбергене выведена статистическая зависимость меридиональной и зональной скоростей конвекции ионосферной плазмы вблизи границы полярной шапки (ГПШ) от параметров ММП. В шести секторах местного времени регрессионные соотношения оказываются существенно различными, что указывает на увеличение/уменьшение полярной шапки, а также на ее смещение вдоль меридиана утро-вечер в зависимости от параметров ММП. Выведена формула, связывающая скорость зонального дрейфа плазмы вблизи ГПШ и величину By ММП в различные часы местного времени. Показано, что в зависимости зонального дрейфа плазмы от BY ММП, присутствует явно выраженная утренне-вечерняя асимметрия, обусловленная неравномерным смещением ГПШ, особенностями крупномасштабной конвекции и структурой продольных токов.

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ, ВЫЗВАННАЯ НЕОДНОРОДНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ЭНЕРГИИ, КАК НАИБОЛЕЕ ПОДХОДЯЩАЯ ТЕОРИЯ ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ШИРОКОПОЛОСНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Чернышов А.А.[1], **Головчанская И.В.**[2], **Козелов Б.В.**[2], **Ильясов А.А.**[1], **Могилевский М.М.**[1]

[1]*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия,* achernyshov@iki.rssi.ru
[2]*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия*

В представленном обзоре рассмотрена теория плазменной неустойчивости, к которой приводит неоднородное распределение плотности энергии, связанное со сдвигом скорости в плоскости, перпендикулярной внешнему магнитному полю. Широкополосная электростатическая турбулентность регулярно регистрируется спутниками и ракетами на авроральных магнитных силовых линиях и наблюдается во всех секторах местного магнитного времени, при любом уровне геомагнитной активности. Считается, что именно широкополосная турбулентность является основным механизмом поперечного нагрева ионов в верхней ионосфере, причем их последующее выталкивание в пробочной конфигурации магнитного поля на большие высоты представляется главным источником ионосферных частиц в магнитосфере Земли. Широкополосный электростатический шум может быть отождествлен как разновидность ионно-циклотронных и ионно-акустических волн, которые возбуждаются плазменной неустойчивостью. Широкополосные электростатические возмущения развиваются на фоне градиентов электрического и магнитного полей, т.е. в существенно неоднородных фоновых конфигурациях. Это дает основания предполагать, что механизм генерации такой турбулентности может быть адекватно описан в нелокальном приближении. Суть физического механизма неустойчивости состоит в том, что плотность энергии электростатической волны из-за сдвига скорости конвекции, связанного с неоднородностью электрического поля, может стать отрицательной в одних областях пространства, оставаясь положительной в других. Если для заданной равновесной конфигурации возникает перекачка энергии из областей с отрицательной плотностью энергии в положительную, то неустойчивость нарастает. Эффект усиливается в присутствии различных неоднородностей плазмы (электрического поля, плотности плазмы, продольного тока). Показано, что неоднородные электрические поля альфвеновской турбулентности могут дестабилизировать волны, являющиеся разновидностью электростатических ионно-циклотронных волн, которые соответствуют неустойчивым решениям нелокального дисперсионного уравнения для возмущений волн ионно-циклотронного типа и свойства которых существенно отличаются от свойств классических ионно-циклотронных волн. Также продемонстрировано, что могут возбуждаться наклонные ионно-акустические моды из-за наличия сдвига в продольной скорости ионов. Причем для волн ионно-акустического типа неустойчивость обеспечивает широкополосный спектр в области значений частот порядка 0.1 от гирочастоты ионов. В спектре таких волн присутствует набор из множества собственных частот и длин волн, обеспечивающих широкополосный спектр, что хорошо согласуется с известными наблюдательными данными. Кроме того, из спутниковых наблюдений известно, что электростатическая неустойчивость, возбуждаемая неоднородным распределением плотности энергии, к которому приводит сильно неоднородное поперечное электрическое поле (сдвиг скорости конвекции плазмы), иногда не развивается внутри нелинейных плазменных структур в авроральной ионосфере, несмотря на то что сдвиг скорости в них, согласно оценкам, достаточен для её возбуждения. Причиной подавления неустойчивости может быть несинфазное изменение электрического поля и продольного тока внутри таких структур. Теоретические предсказания были подтверждены в ряде лабораторных экспериментов с использованием плазменных лабораторных устройств с однородным магнитным полем, таких как Q-машины, камеры для космического моделирования и т.д. Работа выполнена при поддержке РФФИ (№18-29-21037).

Научные задачи и измерительные возможности системы мониторинга ионосферы "Ионозонд-2025"

А.А. Петрукович (1), М.М.Могилевский (1), С.А. Пулинец (1,2), М.И. Панасюк (3), В.И. Оседло (3), В.Д. Кузнецов (4), С.Е. Андриевский (4), В.В. Асмус (5), О.Е. Милехин (5), С.А. Успенский (5), А.Ю. Репин (6), С.В. Кузин (7).

(1) Институт космических исследований РАН

(2) АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

(3) НИИЯФ им. Д.С. Скобельцина МГУ

(4) ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова

(5) НИЦ «Планета»

(6) Институт прикладной геофизики им. Е.К. Федорова

(7) Физический институт им. Н.П. Лебедева РАН

В этом году в нашей стране планируется запуск первой пары спутников "Ионосфера-М", предназначенных для мониторинга окружающего космического пространства. Возможности приборов комплекса целевой аппаратуры позволяют не только решить задачи мониторинга, но и проводить научные исследования для решения фундаментальных задач физики космической плазмы. Будут представлены описания приборов и их измерительные возможности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ВТОРИЧНЫХ КОМПОНЕНТ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В СЕЙСМОАКТИВНОЙ ЗОНЕ

Орлов А.А., Махмутов В.С., Филиппов М.В., Стожков Ю.И., Ролан Ж.-П.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, orlov.aa@phystech.edu

В работе представлены результаты анализа данных наземных измерений заряженной и нейтральной компонент космических лучей и приземного электрического поля в районе астрономического комплекса КАСЛЕО (CASLEO; Эль-Леонсито, Аргентина; S31.47°, W69.17°, высота 2550 м над уровнем моря, жесткость геомагнитного обрезания R_C = 9.8 ГВ), полученных в период 2015-2020 гг.

Основной целью работы является исследование данных наземного экспериментального комплекса, расположенного в районе обсерватории КАСЛЕО, во время проявления сейсмической активности – землетрясений. Указанный наземный комплекс включает в себя детектор заряженных частиц КОВЕР (CARPET) [1-5] и модули «Нейтронный детектор» [6-7], разработанные на Долгопрудненской научной станции ФИАН, а также монитор электрического поля – электростатический флюксметр EMF-100. Данные о землетрясениях, произошедших на удалении до 500 км от КАСЛЕО, взяты из открытого источника – официального сайта геологической службы США [8].

За период июнь 2015 – октябрь 2020 гг. было зарегистрировано 2740 землетрясений. Для каждого события были определены его время (с точностью до минуты), магнитуда, расстояние от эпицентра до КАСЛЕО и глубина залегания гипоцентра. Из сформированных данных следует, что магнитуда землетрясений находится в диапазоне 2.5-8.3 баллов, а гипоцентр находится на глубине от 2.3 до 213.2 км. В целом, события распределены относительно равномерно по месяцам года (в среднем, 25-40 событий в месяц). Исключением является сентябрь 2015 года, в течение которого произошло 622 землетрясения.

В работе проведен анализ данных наземного экспериментального комплекса в районе обсерватории КАСЛЕО, полученных во время отдельных землетрясений и для совокупной выборки событий.

1. *Мизин С.В., Махмутов В. С., Максумов О.С., Квашнин А.Н.* // Кр. сообщ. по физике ФИАН. М.: ФИАН, 2011, №2, 9 – 17, https://doi.org10.3103/S1068335611020023.
2. *De Mendonca R., Raulin J.-P., Bertoni F., Echer E., Makhmutov V., Fernandes G.* // JASTP. 2011. Vol.73. p. 1410, https://doi.org 10.1016/j.jastp.2010.09.034.
3. *Makhmutov V., Raulin J.-P., De Mendonca R.R.S., Bazilevskaya G.A., Correia E., Kaufmann P., Marun A., Fernandes G., Echer E.* // J. Physics: Conf. Ser., 2013, v. 409(1), 012185/1-4, https://doi.org 10.1088/1742-6596/409/1/012185.
4. *De Mendonca R.R.S., Raulin J.-P., Echer E., Makhmutov V.S., Fernandez G.* // J. Geophys. Res.: Space Phys., 2013, Vol. 118(4), 1403-1409, https://doi.org10.1029/2012JA018026.
5. *M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, and O. S. Maksumov. //* Instrum Exp Tech., 2020, Vol. 63, № 3, pp. 388–395. https://doi.org/10.1134/S0020441220030033
6. *M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Y. I. Stozhkov, J.-P. Raulin, E. V. Kalinin.* // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2019, Vol. 83, No. 5, pp. 611–613. https://doi.org/10.3103/S1062873819050137
7. *M. V. Philippov, V. S. Makhmutov, Yu. I. Stozhkov, and O. S. Maksumov.* // Instrum Exp Tech., 2020, Vol. 63, № 5, pp. 716–723. https://doi.org/10.1134/S0020441220050292
8. USGS [Электронный ресурс] // – Режим доступа: https://www.usgs.gov/, свободный – (06.06.2019).

ОТКЛИК СЕЙСМИЧНОСТИ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ: ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ, ЛАБОРАТОРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ПОЛЕВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Новиков В.А., Ключкин В.Н., Окунев В.И.

ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, novikov@ihed.ras.ru

Выполненный ранее анализ взаимосвязи региональной сейсмичности и геомагнитной активности [1, 2] указал на возможность инициирования землетрясений (ЗТ) сильными магнитными бурями с внезапным началом (SSC). При этом рассматриваются две основные гипотезы о возможном триггерном механизме магнитных бурь: развитием циркуляционных движений в тропосфере и их воздействия на очаги ЗТ [3] и электромагнитное (ЭМ) инициирование ЗТ, по аналогии с искусственным ЭМ-воздействием на земную кору, приводящее к пространственно-временному изменению локальной сейсмичности [4].

С учетом результатов работы [5] , указывающих на практическое отсутствие триггерных эффектов при прохождении атмосферных фронтов давления над очагами ЗТ, мы рассматриваем ЭМ триггерный механизм, который заключается в генерации геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в проводящих структурах земной коры - геологических разломах магнитными бурями. Численными оценками показано [6], что даже кратковременные геомагнитные пульсации, вызванные рентгеновским излучением сильных солнечных вспышек, могут генерировать теллурические токи в проводящих зонах разломов, плотность которых сопоставима с плотностью тока, генерируемого искусственным источником, который инициирует слабые ЗТ [4].

Лабораторное моделирование токов, индуцированных в земной коре вариациями вешнего магнитного поля, продемонстрировали их концентрацию в узкой проводящей зоне, имитирующей геологический разлом и превышение плотности тока в разломе над плотностью тока во вмещающих горных породах ~ в 2 раза. В экспериментах на пружинно-блочной модели, имитирующей сейсмогенный разлом, показано, что лабораторное "землетрясение" инициируется подачей тока только в такую проводящую зону разлома, где наблюдается кластеризация акустической эмиссии (аналог микросейсмичности), свидетельствующая о концентрации в этой зоне разлома сдвиговых напряжений, близких к критическим, при которых происходит землетрясение.

Анализ поведения региональной сейсмичности (Греция) после сильной магнитной бури 8 сентября 2017 г. (Кр=8) показывает, что количество землетрясений с M>3 в течение 10 суток после бури выросло почти в 2 раза по сравнению с аналогичным периодом до начала бури. При этом более 80% разломов, на которых произошли ЗТ после бури расположены субмеридионально, т.е. амплитуда ГИТ, генерируемых в них геомагнитной бурей, максимальна.

Таким образом, дальнейшее изучение отклика сейсмичности на геомагнитные бури должно быть сконцентрировано на поведении проводящих разломов, ориентированных соответствующим образом для индукции ГИТ с максимальной амплитудой, и на которых в соответствии со средне- и долгосрочным прогнозом ожидаются сильные землетрясения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-51-53053.

1. Закржевская Н.А., Соболев Г.А. // Физика Земли 2002. № **4**. С. 3–15.
2. Соболев Г.А., Закржевская Н.А. // Вулканология и сейсмология 2004. №. **3.** С. 63-75.
3. Боков В.Н., Воробьев В.Н. // Ученые записки РГГМУ 2018. № **51.** С. 9-21.
4. Тарасов Н.Т и др. // Вулканология и сейсмология 1999. №. **4-5.** С. 152-160.
5. Соболев Г.А. и др. // Вулканология и сейсмология 2012. №2. С.27.
6. Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Novikov V.A. // Earthquake Science 2019. V.**32**, P.26-34.

Простейшая реакторная модель динамики лавин убегающих электронов в грозовых облаках

Стадничук Е.М.

НИУ ВШЭ, МФТИ НИУ, г. Москва, Россия, egrstadnichuk@yandex.ru

Атмосферная физика высоких энергий всё больше и больше привлекает внимание той части научного сообщества, что занимается атмосферным электричеством. Считается, что лавины убегающих электронов, ускоряемые электрическим полем в грозовых облаках, могут играть существенную роль в грозовых явлениях [1]. Кроме того, надёжно установлено, что именно процесс ускорения релятивистских частиц во время грозы лежит в основе такого загадочного природного явления, как наземные гамма-вспышки (Terrestrial Gamma-ray Frlashes, TGF) [2].

Была предложена новая модель динамики лавин убегающих электронов с обратной связью, которая получила название реакторной модели [4]. Рассмотрим случай простейшего реактора: когда две ячейки смотрят друг на друга. Эта модель интересна своей простотой, а также реализуемостью в рамках общепринятых моделей структуры электрического поля в грозовых облаках. В рассматриваемой системе подавляющий вклад в обратную связь будут вносить гамма-кванты. Предположим, что в верхней ячейке зародилась лавина убегающих электронов. Эта лавина по ходу своего развития будет излучать тормозные гамма-кванты, которые способны проникнуть во вторую ячейку. Во второй же ячейке, по мере своего распространения гаммы будут рождать вторичные электроны, у которых есть вероятность развернуться и родить вторичные лавины. Эти лавины в свою очередь излучают новые гаммы, тем самым зацикливая процесс.

Оказывается, что даже в такой простой реакторной модели для возникновения TGF требуются более реалистичные электрические поля, чем в модели Дваера [3]. Если грозовое облако находится на высоте 10 км, то в модели Дваера для возникновения бесконечной позитронной обратной связи требуется, например, однородное поле с напряжённостью 200 кВ на м с протяжённостью порядка 750 метров. В простейшем реакторе требуются, например, две смотрящие друг на друга ячейки с однородным полем, каждое из которых обладает напряжённостью 200 кВ на м и длиной 350 метров.

1. Gurevich A. V. Zybin K. P. Physics-Uspekhi4420011119.
2. Dwyer J. R. Journal of Geophysical Research: Atmospheres1132008. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2007JD009248
3. Dwyer J. R. Geophysical Research Letters302003. https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003GL017781
4. Zelenyi M., Nozik A. Stadnichuk E. AIP Conference Proceedings 21632019060005. https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5130111

УСЛОВИЯ И ПАРАМЕТРЫ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМА СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Подгорный А.И.[1], Подгорный И.М.[2], Борисенко А.В.[1], Мешалкина Н.С.[3]

[1]*ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru*
[2]*ИНАСАН, г. Москва, Россия*
[3]*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Первичное энерговыделение вспышки происходит в солнечной короне на достаточно большой высоте (~ 1/40 – 1/20 радиуса Солнца), что доказано многими наблюдениями. Основной вспышечный процесс высоко в короне может быть объяснен механизмом С.И. Сыроватского: накоплением магнитной энергии в поле токового слоя, который образуется в окрестности особой линии магнитного поля Х-типа. В результате квазистационарной эволюции токового слоя токовый слой переходит в неустойчивое состояние. Неустойчивость вызывает вспышечное освобождение энергии со всеми наблюдаемыми проявлениями вспышки, которые объясняются электродинамической моделью вспышки, предложенной И.М. Подгорным. Модель разработана на основании результатов наблюдений и численного МГД моделирования и использует аналогии с электродинамической моделью суббури, предложенной ранее ее автором.

Исследование механизма вспышки невозможно без проведения МГД моделирования над реальной активной областью, при котором наблюдаемые на фотосфере магнитные поля берутся в качестве граничных условий, и расчет начинается за несколько суток перед появлением вспышек. При выполнении МГД моделирования, никаких предположений о механизме вспышки при постановке задачи не делалось, целью моделирования являлось определить механизм солнечной вспышки. Для того, чтобы ускорить расчет была специально разработана конечно-разностная схема, реализованная в программе ПЕРЕСВЕТ. Схема является противопоточной, абсолютно неявной, и консервативной относительно магнитного потока. МГД моделирование в реальном масштабе времени может быть осуществлено только благодаря параллельным вычислениям. В результате совершенствования параллельных вычислений на графических картах с применением CUDA технологии в значительной мере в результате существенного сокращения обмена данных между памятью графической платы и основной памятью компьютера скорость параллельных вычислений в 120 раз превысила скорость последовательных вычислений на обычном компьютере. Более 20 проведенных модернизаций алгоритма увеличили скорость параллельных вычислений в 7.5 раза.

Расчет в реальном масштабе времени, показал появление численной неустойчивости как вблизи фотосферной, так и нефотосферной границы – она успевает развиться в течении достаточно длительного интервала времени. Проведен выбор условий и параметров задачи с целью стабилизации неустойчивости, которая возникает в первую очередь вблизи границы расчетной области короны, как фотосферной, так и нефотосферной. На нефотосферной границе короны неустойчивость стабилизирована. От фотосферной распространяются возмущения, вызывающие накопление энергии для вспышки, поэтому такие возмущения нельзя искусственно подавлять. В результате применения разработанных методов решение вблизи фотосферной границы стало значительно более устойчивым, но здесь еще предстоит работа по совершенствованию постановки задачи. Моделирование показало появление максимумов плотности на особых линиях магнитного поля с конфигурацией Х-типа, с течением плазмы, приводящим к образованию токового слоя, в магнитном поле которого накапливается энергия солнечной вспышки. Расчеты проведены для активной области АО10365, идет подготовка постановка задачи и подбираются наблюдения для активной области АО11719, в которой 11.04.2013 в 06:55 произошла вспышка бала М6.5.

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ УХОДЯЩЕЙ ДЛИННОВОЛНОВОЙ РАДИАЦИИ В ПЕРИОДЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Караханян А.А., Молодых С.И.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, asha@iszf.irk.ru

Известно, что на временных масштабах больше месяца, инфракрасное излучение на внешней границе атмосферы Земли является линейной функцией температуры подстилающей поверхности [1]. Однако позднее, была обнаружена антикорреляция между сезонными вариациями уходящей длинноволновой радиации (УДР) и изменениями температуры поверхности тропических океанов [2]. Для исследования вопроса о механизме воздействия гелиогеофизических возмущений на радиационный баланс тропосферы проведен анализ вариаций УДР и приповерхностной температуры в спокойных и возмущенных геомагнитных условиях. Согласно физическому механизму, разрабатываемому в ИСЗФ СО РАН, солнечная активность параметрически воздействует на радиационный баланс в тропосфере. Предполагается, что изменения в глобальной электрической цепи, вследствие вариаций солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, приводят к перестройке вертикального профиля объемного электрического заряда, который влияет на состояние водяного пара (основного парникового газа) и, следовательно, на радиационный баланс, в частности на поглощение длинноволновой части спектра ($\lambda > 4$ мкм) [3].

В данной работе на основе среднесуточных данных [4–6] были рассчитаны карты линейной регрессии между УДР и приповерхностной температурой для временных масштабов сезон-год в спокойный период (*PC*-индекс ≤ 0.7) с 1979 по 2018 гг. Показано, что средняя годовая положительная линейная связь между УДР и приповерхностной температурой наблюдается на широтах выше 30°. Данная зависимость нарушается на низких широтах, за исключением полосы постоянного высокого давления. Области отрицательной связи между УДР и приповерхностной температурой обнаружены над океанами в зимний период до широты 60° обоих полушарий.

Для оценки солнечного влияния на уходящее длинноволновое излучение были рассчитаны карты коэффициента регрессионной связи между УДР и приповерхностной температурой во время возмущений (*PC*-индекс > 2.0) и в спокойный период. Проведенный анализ пространственного распределения коэффициента регрессионной связи показал, что он выше в периоды возмущений, чем в спокойных условиях. Гелиогеофизические возмущения приводят к усилению отрицательной и ослаблению положительной линейной связи между УДР и приповерхностной температурой на 5–10%.

1. Будыко М.И. Изменения климата / Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 280 с.
2. Huang Yi, Ramaswamy V. Observed and simulated seasonal co-variations of outgoing longwave radiation spectrum and surface temperature // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. No. 17. P. L17803–L17807. https://doi.org/10.1029/2008GL034859
3. Молодых С.И., Жеребцов Г.А., Караханян А.А. Оценка влияния солнечной активности на уходящий поток инфракрасного излучения // Геомагнетизм и аэрономия 2020. Т. 60. № 2. С. 208–215. https://doi.org/10.31857/S0016794020020108
4. Liebmann B., Smith C.A. Description of a Complete (Interpolated) Outgoing Longwave Radiation Dataset // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. No. 6. P. 1275–1277.
5. Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R. et al. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project // Bull. Amer. Meteor. Soc. 1996. V. 77. No. 3. P. 437–470.
6. Troshichev O.A., Andrezen V.G., Vennerstrom S., Friis-Christensen E. Magnetic activity in the polar cap – A new index // Planet. Space Sci. 1988. V. 36. No. 11. P. 1095–1102.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ КОМПОНЕНТЫ РЯДА РАДИОУГЛЕРОДА С14 ЗА ПОСЛЕДНИЕ 4.5 ТЫСЯЧ ЛЕТ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ КОСМИЧЕСКИМИ ФАКТОРАМИ АСТРОНОМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Кузнецова Т. В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tvkuz3@gmail.com

Данные ряда радиоуглерода С14 за последние 4,5 тысячелетия используются для вычисления компонент длинно - периодической части спектра, включая все их параметры и поиска возможных причин их изменчивости. Применяется метод глобального минимума (МГМ), который позволяет выделять самосогласованно тренды из набора данных и нестационарные гармоники с переменной фазой и амплитудой [1].

В спектре ряда С14 нестационарная компонента с самой большой амплитудой (А) и периодом Т=1096 л включает целые числа сидерических и синодических периодов Венеры. Показано, что Т=1096 л отмечен резонансом орбитальных периодов Земли и Венеры 8:13, а также резонансом 8:5 тропического года Земли и синодического периода Венеры. Tm=1096 л. включает также целое число 3 циклов затмений Square Year=365.4 л. Цикл имеет исключительно долгую продолжительность жизни. Отметим также, что этот цикл затмений представлен в спектре отдельной компонентой с шестой по величине амплитудой.

Следующая по уменьшению амплитуды нестационарная компонента с Т=586 л. является циклом затмений Tetradia=586 л. Цикл управляет регулярностью тетрад лунных затмений и дуэтов солнечных затмений. Показано, что Т=586 л включает также целые числа сидерических и синодических периодов Венеры и отмечен вышеописанными резонансами Земли и Венеры. И наконец Т=586 л включает целые числа сидерических периодов Юпитера и Сатурна, что дает известный орбитальный резонанс этих планет 5:2.

Нестационарная компонента с Т=438 л включает целое число циклов затмений Tritos, который можно использовать для предсказания серий солнечных затмений, которые чередуются по видимости между северным и южным полушариями. Как и в случае с предыдущими компонентами, Т=438 л обеспечивает вышеописанные резонансы Земли и Венеры и включает 22 соединения Юпитера с Сатурном.

Получены временные изменения как отдельных компонент, так и суммы полиномиального тренда и 5-и компонент спектра с самыми большими амплитудами для прогноза. Проведено сравнение компонент спектра глобальной температуры за последнюю тысячу лет вышеописанным методом [2], и компонент спектра С14. Предложен физический механизм влияния Солнца, Луны и планет на концентрацию радиоуглеродов С14 в земных архивах, изложенный в [2].

1. Tsirulnik L.B., Kuznetsova T.V., Oraevsky V.N. Spectral method of global minimum (MGM) and its application to problems of heliospheric and planetary physics. Planet. Space Sci. v. 45, N2, p. 241, 1997.

2. Kuznetsova T.V. Long-term spectral components of global, north and south hemisphere temperatures over the last millennium and solar-lunar forcing. J. Atmosph. and Solar Terr. Phys., v. 210, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105393

ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ В ВАРИАЦИЯХ ИНТЕНСИВНОСТИ СТРАТОСФЕРНОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ: НОВЫЕ ДАННЫЕ

Веретененко С.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, s.veretenenko@mail.ioffe.ru

Продолжено исследование эффектов солнечных протонных событий (СПС) в динамике средней атмосферы на основе данных реанализа NCEP/NCAR [1]. Показано, что во время серии мощных СПС января 2005 года, сопровождавшихся возрастанием потока частиц с энергиями более 165 МэВ, скорость зонального западного ветра значительно увеличивалась в области широт 50-80ºN (области формирования стратосферного полярного вихря) на всех уровнях стратосферы, при этом наибольшее увеличение скорости имело место в верхней части стратосферы. Аналогичное усиление зонального западного ветра в указанной широтной области, свидетельствующее об интенсификации вихря, обнаружено для событий 5-6 и 13-14 декабря 2006 года, в ходе которых также регистрировались частицы с энергиями выше нескольких сотен МэВ [2]. Результаты исследования свидетельствуют о влиянии изменений скорости ионизации в полярной атмосфере, обусловленных мощными солнечными протонными событиями, на состояние стратосферного полярного вихря.

1. Kalnay E. et al. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. **77**. P. 437.
2. Logachev Yu.I. et al. Catalogue of solar proton events in the 23rd cycle of solar activity (1996–2008), Moscow, 2016.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ, МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Миронова И.А.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, i.a.mironova@spbu.ru

В данной работе приводятся экстремальные события космической погоды связанные с мощными геомагнитными бурями, солнечными протонными событиями, геоэффективными солнечными событиями типа GLE (Ground Level Enhancement) и Форбуш-понижениями потоков галактических космических лучей. Отдельно рассматривается атмосферный вклад от каждого экстремального события космической погоды.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ
в рамках научного проекта № 20-67-46016.

ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОЙ И ИОНОСФЕРНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ В ПЕРИОДЫ ДЕЙСТВИЯ ЗИМНИХ ВНЕЗАПНЫХ СТРАТОСФЕРНЫХ ПОТЕПЛЕНИЙ

Медведева И.В.[1,2], Ратовский К.Г.[1]

[1] *ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, ivmed@iszf.irk.ru*
[2] *ИФА им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

Представлена методика оценки атмосферной и ионосферной изменчивости, дающая возможность анализировать проявление активности атмосферных волн различного временного масштаба в большом диапазоне высот верхней атмосферы. В качестве характеристики атмосферной изменчивости используется изменчивость температуры атмосферы на высоте мезопаузы, полученной из спектральных наблюдений гидроксильного излучения (полоса OH(6-2) 834.0 нм, высота максимума излучения ~87 км) в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (51.8°N, 103.1°E, Торы). Вращательная температура молекулы гидроксила отображает температуру атмосферы на высотах мезопаузы. В качестве характеристики ионосферной изменчивости используется изменчивость максимума электронной концентрации ΔNmF2, полученной по данным вертикального зондирования; использованы экспериментальные данные иркутского (52.3° N, 104.3° E) и норильского (69.2 N, 88.0 E) ионозондов DPS-4.

Исследованы значения внутрисуточной и межсуточной атмосферной и ионосферной изменчивости во время действия зимних внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в январе 2013 г. и феврале-марте 2016 г., которые были сопоставлены со средними сезонными значениями. Выявлено, что в периоды анализируемых ВСП наблюдалось усиление атмосферной и ионосферной изменчивости. В области мезопаузы, максимальный эффект ВСП 2013 наблюдался в увеличении межсуточной атмосферной изменчивости, причиной которой может быть интенсификация активности планетарных волн на этих высотах. Анализ межсуточной ионосферной возмущенности в январе 2013 г. показал нарушение ее корреляции с солнечной активностью, причиной которого может быть проявление эффекта ВСП на ионосферных высотах. В вариациях ночных значений ΔNmF2 после начала ВСП на обеих станциях зарегистрированы достаточно мощные возмущения. Незначительное (minor) ВСП в феврале 2016 г., в отличие от ВСП 2013, привело к интенсификации внутрисуточной атмосферной и ионосферной изменчивости, которая может быть вызвана влиянием приливов и внутренних гравитационных волн.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00212. В работе были использованы экспериментальные данные ЦКП «Ангара» (http://ckp-rf.ru/ckp/3056/), полученные в рамках базового финансирования программы ПФНИ (проект 0278-2021-0003).

РЕАКЦИЯ ОЗОНОСФЕРЫ И D-ОБЛАСТИ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ К ПРОТОННОЙ ВСПЫШКЕ НА СОЛНЦЕ В СЕНТЯБРЕ 2017 ГОДА (ТРЕХМЕРНОЕ ФОТОХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

А.А. Криволуцкий, , Т.Ю. Вьюшкова, Л.А. Черепанова, А.А. Куколева, И.Н. Мягкова, Е.А. Гинзбург

Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) Росгидромета,г. Долгопрудный М.О., Россия krivolutsky@mail.ru

Приводятся результаты численного моделирования изменений химического нейтрального и заряженного состава атмосферы Земли, вызванных увеличением потока солнечных протонов в период вспышки на Солнце в сентябре 2017 года. Для расчетов отклика на воздействие частиц была использована глобальная фотохимическая модель CHARM-I (Chemical Atmospheric Research Model with Ions [1]), а также модель общей циркуляции ARM (Atmospheric Reseach Model [2]), созданные в Лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО. Эффект воздействия вспышки на фотохимию нейтральных и заряженных частиц закладывался в модель при реализации численного сценария через соответствующие эффективности воздействия [3,4]. Потоки частиц брались по наблюдениям американского геостационарного спутника GOES-13. Результаты расчетов показали, что изменения в содержании озона и электронной концентрации (область D) в полярных широтах не превышали 10 %, что отражает довольно низкий уровень активности Солнца.

1. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю., Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 4, с. 483-503, 2015.

2. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Вьюшкова Т.Ю., Репнев А.И., Ключникова А.В. Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах 0-135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, №6, с. 808-828, 2015.

3. *Turco R.P., Whitten R.C.* A comparison of several computational techniques for solving some common aeronomic problems, J. Geophys. Res. V. 79. N 22. P. 317 − 319. 1974.

4. Rapp D.P. et al., Cross section for the dissociative ionization of molecules by electron impact, J. Chem. Phys., 42, 4081, 1965.

РОЛЬ СПЕКТРОВ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ СКОРОСТЕЙ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ И ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ВЫСЫПАНИЙ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Миронова И.А.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, i.a.mironova@spbu.ru

Оценка атмосферного отклика на высыпания энергичных частиц требует знания скоростей ионизации, создаваемых этими частицами. Временная и высотная изменчивость скоростей ионизации в атмосфере Земли зависит от энергетических спектров высыпающихся частиц и применяемой функции отклика или параметризации скоростей ионизации атмосферы. В данной работе анализируются спектры полученные с различных спутников и аэростатных наблюдений за одинаковые промежутки времени. Восстановленные скорости ионизации по данным спектрам показывают существенные различия, которые отражаются в оценке результатов моделирования химического состава атмосферы и дальнейших оценок воздействия высыпаний энергичных частиц на озоновый слой.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и DFG в рамках научного проекта № 20-55 -12020.

ОСОБЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ЛЕТОМ 2020 ГОДА И АНОМАЛЬНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ

Мальнева И.В., Черкесов А.А.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (ФГБУ «ВГИ») malnir@mail.ru

Рассматриваются результаты наблюдений по оценке влияния космической погоды на развитие опасных природных процессов в Приэльбрусье в 2020 г., которые продолжаются в режиме онлайн с 2016 года. В этом регионе наиболее опасные процессы (сели, оползни и др.) наиболее чувствительны к погодным условиям. Характер земной погоды летом 2020 г. не позволял ожидать аномальных проявлений этих процессов.

Вместе с тем, в августе 2020 г. в долине р. Герхожансу произошла грозящая катастрофой активизация оползня Бузулган, подобной которой не помнят старожилы этих мест. Оползень перекрыл реку. Образовалась плотина, которая в случае выпадения большого количества осадков могла быть прорвана, и по р. Герхожансу мог сформироваться катастрофический селевой поток. Создалась угроза для г. Тырныауза.

Причина этой активизации была непонятна, так как факторы, вызывающие активизацию оползней, не отличались высокими значениями показателей. Так, первая половина 2020 г. характеризовалась небольшим количеством осадков. По данным метеопоста Тырныауз, в апреле осадков практически не было. В мае они выпали в один день Но всего в количестве 26 мм. Сейсмическая активность в рассматриваемом районе также была слабой.

На основании указанных выше наблюдений, можно предположить, что аномальная подвижка оползня в значительной степени обусловлена характером космической погоды.. Были рассмотрены значения показателей космической погоды за май – август 2020 г. , т.е. за период подготовки и аномальной подвижки оползня Бузулган. При этом использованы данные сайта www.spaceweather.com. Так, с 29 мая 2020 г. начались вспышки на Солнце. Было повышение плотности протонов солнечного ветра до 18 – 22 1/см^3. Образовалась «трещина» в магнитном поле Земли и солнечный ветер проникал в магнитосферу. С этими событиями связаны 2 вспыщки класса М и 2 – класса С. Таких событий до этого времени не было три года. Через несколько дней, 7 июня 2020 г., на Солнце появилось новое растущее пятно. С ним связана солнечная вспышка класса В Естественно, с подобными событиями связано поступление большого количества энергии, которое могло стать важнейшим фактором в развитии оползневого процесса.

Наблюдения велись за основными показателями космической погоды – скоростью солнечного ветра и плотностью протонов в нем. 2 августа 2020 г. Земля входит в поток быстродвижущегося солнечного ветра (более 500 км/с). 3 августа Земля уже находидась внутри быстро движущегося потока солнечного ветра (максимум 709 км/с) .Затем активность Солнца оставалась повышенной до конца августа. Опаснейшая активизация оползня произошла 12 – 13 августа.

Подобная активизация оползня произошла у с. Заюково ниже по течению р. Баксан 25 мая 2005 г Суля по имеющимся материалам, она, возможно, также была связана с воздействием факторов космической погоды.

, На основании рассмотренных данных об активности Солнца летом 2020 года можно отметить, что аномальная подвижка оползня Бузулган не была случайной. Она произошла вследствие синергетического воздействия многих факторов, из которых космическая погода имела большое значение.

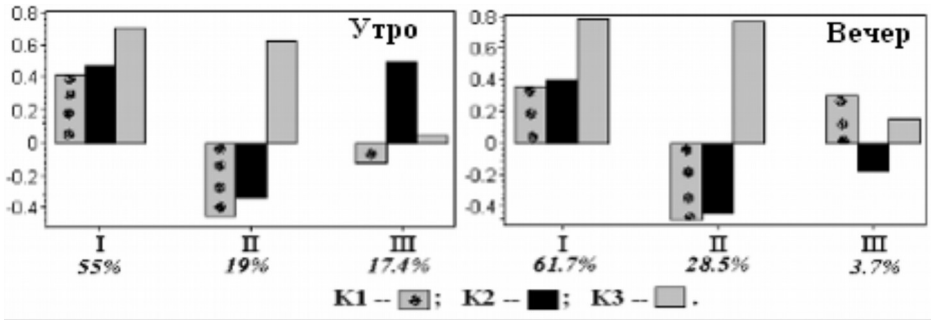
ВОЗРАСТНАЯ ДИНАМИКА КОРРЕЛЯЦИОННЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ АРТЕРИАЛЬНЫМ ДАВЛЕНИЕМ И ПУЛЬСОМ

Шибаев И.Г.[1], **Кукса Ю.И.**[2]

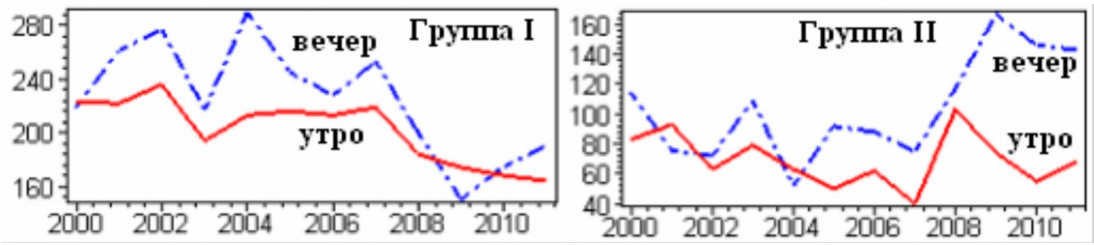
[1] *ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, ishib@izmiran.ru*
[2] *ЦГЭМИ ИФЗ РАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия*

Оценку состояния пациента обычно начинают с анализа артериального давления (АД) и пульса – частоты сердечных сокращений (ЧСС). Так как их значения достаточно изменчивы, то четкой функциональной связи между величинами АД и ЧСС нет. Низкий пульс совсем не означает пониженный уровень артериального давления. А при высоком пульсе, давление может быть не только нормальными, но и в ряде случаев сниженным (при инфаркте миокарда, сердечной недостаточности), так как высокая частота сокращений не оставляет сердцу времени для того чтобы успеть набрать достаточное количество крови и такая работа будет малоэффективна. Важны характер и динамика связи пульса с давлением.

Из длительных наблюдений по программе самоконтроля АД [1] выбран двенадцатилетний интервал (2000÷2011 гг., всего 4383 дня) с более активным поведением пациента и устойчивыми показаниями пульса, САД и ДАД – систолического и диастолического артериального давления. От рядов ЧСС, САД и ДАД мы переходим к корреляционным рядам К1 ÷ К3 для утренних и вечерних показаний, где **:** К1(t) = Corr(ЧСС&САД/dT; t) – динамика коэффициента корреляции между ЧСС и САД **;** К2(t) = Corr(ЧСС&ДАД/dT**;** t) – корреляции между ЧСС и ДАД **;** К3(t) – между САД и ДАД. Теперь состоянию пациента сопоставлена тройка чисел К1÷К3, которая отражает связь между показаниями ЧСС, САД и ДАД. Ниже показаны характеристики трех основных утренних и вечерних групп (кластеров) состояния пациента в этих переменных, ось 0Y – средние значения К1÷К3 по группе, отброшено несколько малочисленных групп – каждая ≤2%. Численности трех утренних групп и первых двух вечерних сравнимы, при этом у утренних и вечерних групп **I/II** структуры подобны. Также утром значима роль (17.4%) группы III с четкой связью ЧСС с ДАД (К2>0.5) и «случайном» поведении САД (К1, К3≈0). В [1] отмечалось, что утренние показания ЧСС/АД менее сбалансированы и организм более подвержен внешнему влиянию. Проявление утром группы III, т.е. более широкий спектр состояний в утренних показаниях, это и отражает.



Разложение состояний групп **I/II** по годам демонстрирует следующий рисунок. У вечерних состояний видна «перекачка» с годами из группы I в группу II. Это демонстрируют и утренние показания, но с активной ролью группы III**:** I=>II, III.



[1] ***Isaikina O., Yu. Kuksa, I. Shibaev*** **Estimation of Stability of Arterial Pressure and Pulse at Changes of Geomagnetic Data and Atmospheric Pressure / Annual Research & Review in Biology 9(1): 1-11, 2016, Article no.ARRB.21656 ISSN: 2347-565X, NLM ID: 101632869**

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ

Воробьев А.В.[1,2], **Пилипенко В.А.**[2,3], **Красноперов Р.И.**[2], **Воробьева Г.Р.**[1], **Lorentzen D.A.**[4]

[1] Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия; [2]Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия; [3]Институт физики Земли, г. Москва, Россия; [4]Birkeland Center for Space Science, University Centre in Svalbard, Svalbard, Norway

geomagnet@list.ru

Опыт работы с известными сервисами для мониторинга геофизических параметров в области аврорального овала позволил выявить ряд характерных и, в принципе, повторяющихся от реализации к реализации присущих им недостатков: невозможность динамического масштабирования и добавления дополнительных слоев; малое число отображаемых параметров; отсутствие данных о текущем состоянии космической погоды и базовых инструментов для пространственного анализа визуализированных параметров и др.

В силу геопространственной специфики распределения анализируемых данных (узкие высокоширотные пояса) по причине искажения геометрического подобия контуров, соотношения площадей земной поверхности и картографических искажений проекций традиционные плоские картографические подложки использовать нецелесообразно, и при реализации системы стоит делать выбор в пользу виртуальных глобусов. Исключение составляют плоские проекции северной и южной полусфер, однако помимо того, что такой вид карт является достаточно экзотичным и не поддерживается большинством доступных программных библиотек, он так же уступает трехмерной модели Земли по качеству визуального восприятия информации.

На базе технологии «виртуальный глобус» предлагается подход (архитектура и ее программная реализация) к созданию веб-ориентированной системы визуализации геофизических параметров в авроральной зоне (www.aurora-forecast.ru). В качестве визуализируемых данных выступают интенсивность (вероятность наблюдения невооруженным глазом) полярных сияний получаемые в соответствии с моделью OVATION и потенциалы электрического и магнитного полей, рассчитанные согласно модели Веймера.

Предполагается, что рассмотренный подход к визуализации геофизических параметров в области аврорального овала обеспечит повышение эффективности работ, связанных с исследованием динамики аврорального овала, и в конечном итоге поможет выявить новые знания относительно топологии магнитосферы и ее изменениях, например, во время геомагнитных бурь и суббурь.

Работа поддержана грантами РФФИ № 20-07-00011, РНФ № 16-17-0012.

1. Vorobev, A.V., Pilipenko, V.A., Reshetnikov, A.G., Vorobeva, G.R., Belov, M.D. Web-oriented visualization of auroral oval geophysical parameters // Scientific Visualization 2020. No.12(3). P. 108-118

2. Vorobev, A.V., Pilipenko, V.A., Krasnoperov, R.I., Vorobeva, G.R., Lorentzen, D.A. Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the “virtual globe” technology // Russian Journal of Earth Sciences 2020. 20(6)

ЗАВИСИМОСТЬ ПРОБЕГА ГАММА-КВАНТА ОТ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ

Землянская Д. И. **Ефремова В. А.**

МФТИ(ГУ), г. Москва, Россия, zemlianskay.d@phystech.edu

Большой интерес для физики атмосферы представляет исследование физического явления, предложенного Гуревичем, лавинообразного размножения в веществе быстрых электронов, которое называют пробоем на убегающих электронах (ПУЭ). Во процессе распространения в атмосфере они могут вызвать рождение гамма-квантов, которые влияют на динамику процесса. Поэтому возникает интерес к исследованию гамма-квантов в данной системе.

При попадании в среду гамма-квант производит электроны, которые при определенной собственной энергии являются активаторами пробоя на убегающих электронах, поэтому важной характеристикой грозового облака является длина пробега гамма-кванта. Она, а также распределение рожденных квантов, были исследована в данной работе при разных характеристиках облака.

Результаты получены в ходе моделирования распространения электронов в лавине с помощью библиотеки Geant4. Исследованы гамма-кванты с начальной энергией 1, 5, 9 МэВ в полях в диапазоне 100 - 300 кВ/м на высоте 10 км от поверхности Земли. Одним из итогов нашей работы является то, что модель пробоя на убегающих электронах лучше всего соответствует теории Гуревича на низких полях и энергиях гамма-кванта. При повышении данных параметров наблюдаются несоответствия. Также была замечена линейная зависимость длины пробега и длины затухания гамма-кванта от величины поля.

ДОЛГОЖИВУЩИЕ МЕТЕОРНЫЕ СЛЕДЫ, СФОРМИРОВАННЫЕ ПРИ РАДИАЛЬНОМ РАСШИРЕНИИ КРУПНЫХ МЕТЕОРОИДОВ

Михалев А.В.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, mikhalev@iszf.irk.ru

Согласно классической физике метеорных явлений излучение метеоров формируется в коме, т.е. нагретой газовой оболочке, состоящей из смеси воздуха и метеорных паров, обычно сопровождается линейным метеорным следом вдоль траектории метеороида, и далее может трансформироваться под действием преимущественных ветров на высотах высвечивания метеоров. В работе [1] описаны случаи регистрации эллипсоидальных или квазикруговых долгоживущих метеорных следов. Изображения необычных метеорных следов иногда появляются и в интернете (см., например, изображение яркого метеора со следом из потока Геминид, зарегистрированного 9 декабря 2010 года в САО РАН). В качестве основной проблемы при интерпретации таких следов следует отметить механизм образования необычной геометрической структуры долгоживущих метеорных следов.

В настоящей работе рассматривается возможный механизм образования долгоживущих метеорных следов в рамках модели мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической силы и поперечным расширением, впервые предложенной в 1979 г. С.С. Григоряном [2] и развитой в последующие годы другими авторами.

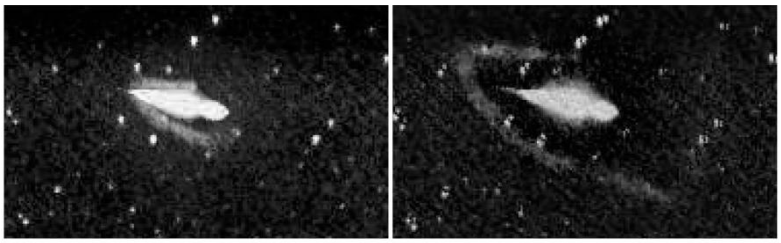


Рис.1. Комбинированные изображения, полученные наложением вспышки метеора (в центре изображений) и метеорного долгоживущего следа через ~ 140 сек (левый рисунок) и ~ 340 сек (правый рисунок).

В рассматриваемом событии долгоживущий метеорный след определялся формой метеороида и его динамикой в процессе разрушения метеорного тела. Метеорный след стал формироваться вблизи поверхности тела метеороида при его радиальном расширении и продольным сжатии, что согласуется с моделью Григоряна [2] мгновенного разрушения метеорного тела под действием аэродинамической силы и поперечным расширением при разрушении метеорного тела упругими волнами. Метеорный след «уходит» в обратном направлении траектории полета основного тела и поперек, что согласуется с [2].

Ранее было показано [1], что крупные метеорные частицы (≥ 100 мкм) при горизонтальном распространении на высотах ~ 70-120 км могут распространяться без потери скорости на расстоянии десятки-сотни километров. В этом случае свечение метеорного следа может определяться классическими механизмами собственного свечения метеорного вещества (т.е. FeI, NaI и др. соединениями) и газовыми составляющими атмосферы. Вероятно, это первое экспериментальное подтверждение теоретической модели Григоряна [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00520

1. Михалев А.В., Белецкий А.Б., Васильев Р.В и др. // Долгоживущие метеорные следы. Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5, № 3. С. 130–139.

2. Григорян С.С. О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // Космические исследования. 1979 Т. 17, № 6. С. 875–893.

ВЛИЯНИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА РЕКУРРЕНТНЫЙ ПЕРИОД ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Новиков В.А., Окунев В.И., Ключкин В.Н.

ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, novikov@ihed.ras.ru

Полученные в последнее время результаты анализа всплеска глобальной и региональной сейсмической активности после сильной солнечной вспышки класса X9.3 и последовавшей за ней магнитной бури 8 сентября 2017 г. (Кр=8) [1] вновь указали на возможность инициирования землетрясений (ЗТ) сильными вариациями геомагнитного поля, генерирующими всплеск геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) в проводящих сейсмогенных разломах земной коры. В дополнение к полевым наблюдениям, в лабораторных экспериментах на пружинно-блочной модели [2, 3] продемонстрирован триггерный эффект импульса тока, подаваемого в имитатор разлома земной коры и инициирующего лабораторное "ЗТ". При этом воздействие тока наиболее эффективно, когда сдвиговые напряжения в модельном разломе находятся на уровне 0,98-0,99 от критического значения [3]. Механизм инициирования ЗТ электрическим током пока до конца не ясен, при этом в лабораторных условиях плотность тока, инициирующего модельное сейсмическое событие, на несколько порядков превышает оценки плотности ГИТ в очаге ЗТ. В связи с этим необходимо продолжить поиск дополнительных фактов, подтверждающих (или опровергающих) такой триггерный эффект.

Каталоги ЗТ, которые повторяются неоднократно в одном и том же месте, с одной и той магнитудой и примерно с одним и тем же рекуррентным периодом (периодом накопления сдвиговых напряжений в разломе до очередного ЗТ) являются идеальными базами данных для проверки влияния сильных геомагнитных бурь на время возникновения ЗТ. Повторяющиеся ЗТ обнаружены в различных регионах земного шара (Калифорния, Китай, Япония). Нами использован каталог 165 семейств, содержащих ~ 2500 повторяющихся ЗТ Центральной Калифорнии [4] для проверки вероятности изменения интервалов повторяемости ЗТ под воздействием сильных магнитных бурь с Кр=8-9 [5]. Поскольку вслед за локальным ЗТ 2004 г. Parkfield с магнитудой M6 последовали явные изменения рекуррентного периода вследствие динамического воздействия, то анализ проведен только до момента его возникновения. Использован метод Монте-Карло [4] для сравнения наблюдаемого числа укороченных интервалов повторения после геомагнитных возмущений с распределением этого числа, оцененным для рандомизированных времен возмущения. Результаты свидетельствуют о слабой корреляции между геомагнитными возмущениями с Кр=8-9 и сокращенными интервалами повторяемости ЗТ. Тем не менее, следует отметить, что полученный коэффициент корреляции превышает аналогичное значение, рассчитанное для динамических воздействий [4] на рекуррентный период, почти в 2 раза. При этом динамическая триггерная сейсмичность является общепризнанным и доказанным фактом, существующем в природе, что является дополнительным подтверждением реального существования и электромагнитного инициирования ЗТ сильными геомагнитными бурями.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-51-53053.

1. Novikov V.A. et al // Annals of Geophysics 2020. V. **63**, 5. PA554.
2. Novikov V.A. et al // Earthquake Science 2017. V.**30**, 167-172.
3. Новиков В.А. и др. // Тригерные эффекты в геосистемах 2017. С. 174-176.
4. Wu C. et al // Geophys. Res. Lett. 2014. V. **41**, P.1499-1505.
5. https://www.spaceweatherlive.com/ru/avroralnaya-aktivnost/tor-50-reyting-geomagnitnyh-shtormov.html

Оценка количества убегающих электронов в атмосфере Земли

Т.М.Хамитов, М.Е. Зелёный, А.А.Нозик, Е.К. Свечникова, Е.М.Стадничук

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)
hamitov.tm@phystech.edu

В последнее время интерес многих исследователей вызывают так называемые лавины убегающих электронов (RREA). Существует множество моделей, описывающих это явление. В недавней статье [1] представлено моделирование лавин методом Монте-Карло. В статье рассматривается переход от лавины к стримеру через критическую стадию, когда собственное поле становится сопоставимым с внешним полем. Но в нашей работе [2] собственное поле лавины не учитывается, так как в нашем моделировании лавина не достигает критической стадии. Одним из основных результатов [1] является оценка количества электронов в одной лавине: 10^{17}-10^{18} . Это значение значительно превышает значения, представленные в наших расчетах. Разница может быть связана с некоторыми приближениями, сделанными в статье [1]. Результаты моделирования в GEANT4 показывают сомнительность выводов, сделанных в [1], где количество электронов в RREA сильно завышено. Чтобы проиллюстрировать физическую причину ограничения числа частиц, мы даем простую аналитическую оценку верхней границы.

Литература:
1)The critical avalanche of runaway electrons, Evgeny Oreshkin ,EPL, 124 1 (2018) 15001
DOI: https://doi.org/10.1209/0295-5075/124/15001
2)Estimation of number of runaway electrons per avalanche in Earth's atmosphere
T. Khamitov, A. Nozik, E. Stadnichuk, E. Svechnikova and M. Zelenyi
EPL, 132 3 (2020) 35001
DOI: https://doi.org/10.1209/0295-5075/132/35001

Мониторинг электромагнитного «загрязнения» околоземного космического пространства

Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Мазур Н.Г.
Институт физики Земли РАН, Москва

Электромагнитные импульсы и излучения являются не только тонким индикатором возмущений космической погоды, атмосферных явлений, и техногенной деятельности, но и резонансно воздействуют на динамику высокоэнергичных частиц в земной магнитосфере. По данным магнитометров и электрических антенн на борту низкоорбитальных спутников обнаружены электромагнитные шумы в верхней ионосфере, создаваемые атмосферной грозовой активностью, катастрофическими тайфунами, наземными передатчиками и линиями электропередач. Антропогенное электромагнитное загрязнение околоземного пространства постоянно нарастает по мере индустриального прогресса, и уже в ближайшее время Земля будет находиться в электромагнитном окружении, создаваемым не природными процессами, а промышленной деятельностью человека. Это обстоятельство с неизбежностью скажется на протекании процессов в плазме околоземного пространства. Нами разработаны численные модели распространения электромагнитных импульсов и излучений от различных типов источников в верхнюю ионосферу Земли: грозовых разрядов, работы ELF передатчиков, сетей промышленных 50/60 Гц линий электропередач.

БЫСТРЫЕ МГД-ВОЛНЫ В АКТИВНЫХ РАЙОНАХ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Офман[1], Л., Лю [2], В.

[1]НАСА Центр Космических Полетов Годдарда и Католический Университет Америки, Гринбелт, Мэриленд, США, ofman@cua.edu

[2]Лаборатория солнечной физики и астрофизики Локхид-Мартина, Пало-Альто, Калифорния, США; BAERI, Моффет Филд, Калифорния, США; Лаборатория экспериментальной физики Хансена, Стэндфордский университет, Стэнфорд, Калифорния, США

Квазипериодические быстрые магнитозвуковые волны (QFP) в солнечных корональных активных областях (AR) наблюдаются во время некоторых вспышках в телескопе SDO/AIA в эмиссии EUV и ассоциируются с пульсациями вспышек [1]. Эти волны распространяются со скоростью ~ 1000 км/с и переносят значительный поток энергии. Наблюдаемые свойства волн QFP используют для корональной сейсмологии в сочетании с МГД моделированием [2,3]. Наблюдаемые QFP волны могут достичь больших амплитуд с нелинейными эффектами, а также могут взаимодействовать с другими МГД волнами. Мы показываем результаты наших 3D МГД моделей волн QFP в корональных активных областях, исследуя генерацию, распространение, и отражение этих волн. Наши модели демонстрируют линейные и нелинейные особенности волн, а также нелинейную генерацию стоячих волн в магнитных петлях. Также, мы показываем результаты применения волн QFP в корональной сейсмологии для определения магнитных и тепловых свойств активных областях солнечное короны.

[1] Liu, W., Ofman, L., Solar Physics, **289**, 3233, doi: 10.1007/s11207-014-0528-4, 2014.
[2] Ofman, L., Liu, W., Title, A.M., Aschwanden, M.J., ApJ, **740**, L33, doi: 10.1088 /2041-8205/740/2/L33, 2011.
[3] Ofman, L., Liu, W., ApJ, **860**, 54, doi: 10.3847/1538-4357/aac2e8, 2018.

PG ПУЛЬСАЦИИ, НАБЛЮДАЕМЫЕ СПУТНИКАМИ ARASE, GOES И НАЗЕМНЫМИ СТАНЦИЯМИ

В.Б. Белаховский[1], В.А. Пилипенко[2], К. Шиокава[3], Е. Миоши[3]

[1] – *Полярный геофизический институт, г. Апатиты*
[2] – *Институт физики Земли РАН, г. Москва*
[3] – *Институт исследования околоземного космического пространства, г. Нагоя, Япония*

Абстракт. В работе исследована физическая природа Pg (pulsation giant) пульсаций, которые наблюдались в магнитосфере японским спутником Arase, геостационарными спутниками GOES и наземными станциями сетей THEMIS, CARISMA. Pg пульсации относятся к Pc4 частотному диапазону, для них характерна монохроматичная форма. Для события 4 мая 2017 года по данным спутника Arase волновой пакет Pg пульсаций был зарегистрирован в послеполуночном секторе MLT в интервале 08-10 UT. Пульсации наиболее выражены в радиальной компоненте геомагнитного поля, их частота составляла около 13 мГц. Pg пульсации, наблюдаемые в магнитосфере, сопровождались пульсациями с тем же периодом по данным ряда наземных магнитных станций, находящихся вблизи сопряженной точки. Наиболее сильно пульсации по данным наземных станций были выражены в Y-компоненте геомагнитного поля. Pg пульсации возбуждались при очень спокойных геомагнитных условиях (SYM-H = 10 нТл, AE=100-150 нТл). Предполагается, что расширение плазмосферы при низкой геомагнитной активности приводит к увеличению плотности плазмы в районе геостационарной орбиты, что создает благоприятные условия для возбуждения Pg пульсаций за счет дрейф-баунс резонанса протонов и силовых линий геомагнитного поля в магнитосфере.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ИОННО-ИОННЫХ ГИБРИДНЫХ УНЧ-ВОЛН В МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ, ОБОГАЩЕННОЙ ТЯЖЕЛЫМИ ИОНАМИ

О.С. Михайлова, Д.Ю. Климушкин, П.Н. Магер

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, o_mikhailova@iszf.irk.ru

Исследована пространственная структура ионно-ионных гибридных (ИИГ) ультранизкочастотных (УНЧ) волн диапазона Pc1. Эти волны возникают в плазме в присутствии тяжелых ионов. Подобно альфвеновским волнам, ИИГ-волны могут быть тороидальными или полоидальными. Из-за различия между тороидальной и полоидальной частотами в магнитосфере может сформироваться поперечный волновод для полоидальных ИИГ-волн. Резонатор возникает вблизи локального минимума полоидальной частоты. Ширина резонатора и спектр собственных частот зависят от плотности и концентрации тяжелых ионов в плазме. Получена полная пространственная структура ИИГ-волн. Получена бегущая по азимуту волна, локализованная по радиусу и в направлении вдоль силовых линий.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ II.16 ИСЗФ СО РАН, а также при частичной поддержке грантом РФФИ №20-55-53009.

1. Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. V.**62**. P. 025026.
2. Mikhailova O.S., Mager P.N., Klimushkin D.Yu. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2020. V.**62**. P. 095008.

СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯИХ ВНЕШНИХ ГРАНИЦ МАГНИТОСФЕРЫ И ИХ СВЯЗЬ С МАГНИТОСФЕРНЫМИ РЕЗОНАНСАМИ

Савин С. П. [a*], **Ляхов В. В.** [b], **Нещадим В.М.** [b], **Зеленый Л. М.** [a], **Климов С. И.** [a], **Скальский С. А.** [a], **Лежен Л. А.** [a]

[a]*ИКИ РАН, РФ, ssavin@iki.rssi.ru*
,[b]*DTO "Institute of Ionosphere", Almaty, Kazakhstan,*

Мы впервые исследуем линейные неустойчивости ударной волны и их связь с резонансами у магнитопаузы и внутри нее через нелинейные резонансы и каскады.

Мы рассматриваем ударную волну как плоскую мембрану, закрепленную в подсолнечной точке. Это приближение можно считать приблизительно справедливым до расстояния от подсолнечной точки около 10 R_E в антисолнечном направлении вдоль оси Солнце – Земля.

Мы применяли подобное приближение для магнитопаузы, но считали, что она закреплена по краям [1]. В [1] мы получили для размера муьбраны 10 R_E минимальную линейную резонансную частоту 0.6 мГц, а для 25 R_E – около 0.24 мГц. Однако, в эксперименте наблюдаются спектральные и би-спектральные максимумы и 3х-волновые каскады на резонансных частотах примерно до 0.002 мГц. В [1] мы предположили, что это собственные резонансы ударной волны.

Наша новая модель подтверждает это. Кроме того, мы получили и гармонику вблизи 0.24 мГц, которая напрямую может взаимодействовать резонансом на магнитопаузе.

Мы приводим данные, которые показывают, что примерно в половине случаев резонансы могут возбуждаться на ударной волне и путем нелинейных 3х-волновых резонансов возбуждать более высокочастотные сжимаемые мембранные резонансы у магнитопаузы. Последние, в свою очередь, возбуждают – также через нелинейные взаимодействия – еще более высокочастотные Альвеновские резонансы магнитных силовых линий. Эти колебания и доходят до Земли, где регистрируются в виде «магических частот»:

0,7; 1,3; 1,9; 2,6; 3,3; 4,8,… мГц

В 48% случаев резонансы сначала возбуждаются у магнитопаузы, а потом вовлекают в резонанс и ударную волну, и силовые линии. Причем из-за большей Альвеновской скорости в магнитосфере резонансы сначала наблюдаются на Земле.

1. С. П. Савин и др., ЖЭТФ, 2021, том 159, вып. 2, стр. 1–11, СОБСТВЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ ГРАНИЦЫ МАГНИТНОГО БАРЬЕРА, ОБТЕКАЕМОГО ПЛАЗМОЙ: МЕМБРАННАЯ МОДЕЛЬ ГРАНИЦЫ, ЛИНЕЙНЫЕ И НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЗОНАНСЫ И СВЯЗИ С ВНУТРЕННИМИ МОДАМИ.

ГЛОБАЛЬНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ ПОЛОИДАЛЬНЫХ PC4-5 ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫХ СУББУРЕЙ

Рубцов А.В.[1,2], Михайлова О.С.[1], Климушкин Д.Ю[1].

[1]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия, avrubtsov@iszf.irk.ru*
[2]*НИИ прикладной физики, Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*

Данное исследование представляет анализ волн диапазона Pc4-5, наблюдавшихся спутниками миссий Van Allen Probes, THEMIS и GOES в широком азимутальном секторе (от 7 до 17 MLT) и на различных расстояниях от Земли (4.5–8 R_E) в течение ~12 часов. Первое наблюдение волн совпало по времени с изолированной суббурей.

По данным магнитного поля определено, что волны имеют полоидальную поляризацию, а колебания представляют собой биения. Частота волн находится в пределах от 5 до 15 мГц. Точное значение частоты меняется в зависимости от L-оболочки и от момента наблюдения волны. Обнаружен ступенчатый характер убывания частоты при удалении от Земли (по данным миссии THEMIS). Регистрация волны на одной и той же L-оболочке, но в разные моменты времени, показала увеличение наблюдаемой частоты (по данным миссий GOES и Van Allen Probes). Азимутальное распределение космических аппаратов не оказало влияния на наблюдаемые параметры волны.

Механизмом генерации волны является резонанс силовых линий. Однако колебания потоков ионов и электронов не имеют однозначного сходства с колебаниями магнитного поля из-за чего затруднительно определить энергию резонирующих частиц. На данный момент мы предполагаем, что резонансная энергия находится в диапазоне от 25 до 100 кэВ. Однако одновременно с колебаниями магнитного поля наблюдается появление большого количества холодных частиц (<100 эВ). Значения азимутального волнового числа, полученные благодаря эффекту конечного ларморовского радиуса, находятся в диапазоне от –20 до –80, что соответствует азимутально-мелкомасштабной волне.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-55-53009.

РОЛЬ МАГНИТОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ В ГЕНЕРАЦИИ И РАПРОСТРАНЕНИИ ПО АЗИМУТУ И МЕРИДИАНУ Pi3 ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ

Моисеев А.В.

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, moiseev@ikfia.ysn.ru

На примере события 8 декабря 2017 г. рассматривается динамика Pi3 пульсаций (с периодом T=20-30 мин), регистрировавшихся в полуночном секторе магнитосферы с максимальной интенсивностью в области ионосферной проекции конвекционных электроструй DP 2 токовой системы. Pi3 пульсации в данном событии были особенно хорошо выражены в предполуночном секторе с амплитудой до 300 нТл и длительностью до 2.5 часов. Амплитуда пульсаций быстро спадала с уменьшением широты от Ф'=72° до Ф'=63°. Форма колебаний существенно различалась в разных секторах MLT. Событие регистрировалось на фазе спада высокоскоростного потока солнечного ветра в отсутствии магнитной бури в интервале, характеризующемся южным направлением Bz компоненты межпланетного магнитного поля (ММП). В Bz компоненте ММП наблюдались иррегулярные колебания в диапазоне частот Pi3, при этом заметных изменений динамического давления солнечного ветра не наблюдалось. По наземным геомагнитным наблюдениям обнаружено азимутальное распространение пульсаций со скоростью 0.6-10.6 км/с на восток в послеполуночном и на запад в предполуночном секторе. Анализ динамики пульсаций по меридиану выявил их распространение к экватору со скоростью 0.7-7.9 км/с. В проекции на магнитосферу скорости близки по величине к наблюдаемым скоростям распространения суббуревых инжекций электронов. В утреннем секторе магнитосферы во время наземных пульсаций регистрировались мелкомасштабные осцилляции невидимые на Земле и имеющие преобладающую компрессионную компоненту.

Предполагается, что распространение колебаний геомагнитного поля в этом событии определяется динамикой инжектированных частиц под действием крупномасштабного электрического поля магнитосферной конвекции, которая вызывает движение плазмы к Земле вследствие пересоединения в хвосте магнитосферы. Мелкомасштабные колебания в магнитосфере были вторичными, возбуждаемыми колебаниями солнечного ветра, проникающими в магнитосферу.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-45-140037.

ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ РЕШЕНИЙ ОБОБЩЕННОГО НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ ШРЕДИНГЕРА В НЕОДНОРОДНЫХ И НЕСТАЦИОНАРНЫХ СРЕДАХ

Белашов В.Ю., **Харшиладзе О.А.**, **Белашова Е.С.**

КФУ, г. Казань, Россия, vybelashov@yahoo.com

Если в системе ВК [1, 2]

$$\partial_t u + \hat{A}(t,u)u = f, \quad f = \sigma\int_{-\infty}^{x}\Delta_\perp u dx + f', \quad \Delta_\perp = \partial_y^2 + \partial_z^2$$

оператор имеет вид $\hat{A}(t,u) = i\,[\gamma|u|^2 - \beta\partial_x^2] + \alpha/2$, она представляет собой 3D обобщенное уравнение Шредингера (3-GNLS) [2, 3]:

$$\partial_t u + i\gamma|u|^2 u - i\beta\partial_x^2 u + (\alpha/2)u = \sigma\int_{-\infty}^{x}\Delta_\perp u\,dx + f', \tag{1}$$

где $\alpha, \beta, \gamma = \varphi(t,x,y,z)$, $f' = f'(t,x,y,z)$, и $(\alpha/2)u$ описывает диссипативные эффекты, а u – огибающая волнового пакета (импульса). Уравнение (1) описывает динамику огибающей модулированных нелинейных волн и импульсов (волновых пакетов) в средах с дисперсией и имеет многочисленные важные приложения в физике плазмы (например, описывает распространение ленгмюровских волн в горячей плазме), нелинейной оптике (распространение световых импульсов в кристаллах, оптоволокне и плоских оптических волноводах), оно описывает, в частности, такие явления, как турбулентность, волновой коллапс и оптическая самофокусировка. Уравнение используется и в других областях физики – таких, например, как теория сверхпроводимости и физика низких температур (в частности, обычное уравнение NLS есть упрощенная 1D форма уравнения Гинзбурга-Ландау (1950), введенного ими при описании сверхпроводимости), гравитационные волны малой амплитуды на поверхности глубокой невязкой жидкости и др. Отметим, что уравнение (1) не является полностью интегрируемым, и его аналитические решения в общем случае не известны (за исключением, пожалуй, гладких решений типа уединенных волн). Однако, с использованием подходов, развитых в [1–3] для других уравнений системы ВК [GKP, когда $\hat{A}(t,u) = \alpha u\partial_x - \partial_x^2(\nu - \beta\partial_x - \gamma\partial_x^3)$, и 3-DNLS, если $\hat{A}(t,u) = 3s|p|^2 u^2\partial_x - \partial_x^2(i\lambda + \nu)$], можно исследовать устойчивость возможных решений уравнения 3-GNLS, что и было реализовано в настоящей работе.

В работе аналитически получены условия устойчивости солитоноподобных решений уравнения 3-GNLS (1) и изучены случаи устойчивой и неустойчивой (с образованием бризеров) эволюции импульсов различной формы, а также взаимодействие 2- и 3-мпульсных структур, приводящее к формированию устойчивых и неустойчивых решений. Полученные результаты могут быть полезны в многочисленных приложениях в физике плазмы (включая космическую), нелинейной оптике и многих других областях физики.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров. Работа была поддержана Национальным научным фондом Грузии им. Шота Руставели (SRNF) (грант № FR17 252).

1. Belashov V.Yu., Vladimirov S.V. Solitary Waves in Dispersive Complex Media. Theory, Simulation, Applications. Springer-Verlag. 2005. 303 p.
2. Belashov V.Yu., Belashova E.S., Kharshiladze O.A. // Adv. Space Res. 2018. V. **62**. P. 65.
3. Belashov V.Yu., Kharshiladze O.A., Rogava J.L. // J. Astrophys. Aerospace Tech. 2018. V. **6**. P. 38.

ТЕПЛОВАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ ПРЕДВСПЫШЕЧНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ

Леденцов Л.С.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, leonid.ledentsov@gmail.com

Рассмотрено влияние джоулева и вязкого нагрева, теплопроводности и радиационного охлаждения на структурную устойчивость предвспышечного токового слоя. Решена задача о малых возмущениях в кусочно-однородной МГД-модели токового слоя. Решение допускает образование неустойчивости теплового характера. Модель позволяет получить точные аналитические выражения для инкремента и пространственного масштаба неустойчивости, а также их простые приближения в условиях солнечной короны. В линейной фазе время нарастания неустойчивости пропорционально характерному времени радиационного охлаждения плазмы и зависит от логарифмических производных функции радиационного охлаждения по параметрам плазмы. Неустойчивость приводит к поперечной фрагментации токового слоя с пространственным периодом 1-10 ММ в широком диапазоне параметров корональной плазмы. Рассмотренная неустойчивость может быть ответственна за запуск первичного энерговыделения в солнечных вспышках.

ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ С ДВУМЯ ПЕРИОДАМИ МОДУЛЯЦИИ НА ЗЕМЛЕ И НА СПУТНИКАХ

А.Г. Демехов[1,2], M. Hajoš[3], J. Manninen[4], Д.Л. Пасманик[2], А.С. Никитенко[1], O. Santolík[3,5], C. Martinez-Calderon[6], K. Shiokawa[6], M. Ozaki[7], Д.Г. Баишев[8], Y. Miyoshi[6], Y. Kasahara[7], S. Matsuda[9], I. Shinohara[9]

[1] *ПГИ РАН, г. Апатиты, Россия, andrei@ipfran.ru*
[2] *ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия*
[3] *Institute of Atmospheric Physics of the Czech Academy of Sciences, Prague, Czechia*
[4] *Sodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, Finland*
[5] *Faculty of Mathematics and Physics, Charles University, Prague, Czechia*
[6] *Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan*
[7] *Kanazawa University, Kanazawa, Japan*
[8] ИКФИА СО РАН, ЯНЦ СО РАН, *Якутск, Россия*
[9] *Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Kanagawa, Japan*

Представлены результаты анализа одновременных наблюдений квазипериодических ОНЧ излучений на Земле и на спутниках. Рассмотрено событие, когда квазипериодические излучение одновременно наблюдались на пяти спутниках (Cluster, Van Allen Probes, ERG) и на четырех наземных станциях включая Каннуслехто в северной Финляндии, Ловозеро на Кольском п-ове, Баренцбург на арх. Шпицберген и Маймага в Сибири. Наземные станции регистрировали эти сигналы были в течение более шести часов (с 05:40 до 10:00 UT), спутники Cluster — с 6:10 до 9:40 UT, и спутники Van Allen Probes — с 05:30 до 14:30 UT. Спутниковые наблюдения имели место в широком диапазоне L-оболочек: от $L \approx 4$ для Van Allen Probes до $L \approx 11.3$ для Cluster. Геомагнитные условия были очень спокойными.

Как в спутниковых, так и в наземных наблюдениях зарегистрированы два различных периода модуляции: меньший из них составлял около 50 с и соответствовал периоду повторения квазипериодических элементов, а больший, равный примерно 12 мин, соответствовал медленному изменению амплитуды квазипериодических излучений. Квазипериодические излучения, одновременно наблюдаемые в разных точках, хорошо коррелировали между собой, что говорит о временном характере регистрируемой модуляции.

Анализ характеристик распространения волн, наблюдаемых на спутниках, показал, что квазипериодические излучения имели небольшие (меньше 40°) углы волнового вектора по отношению к геомагнитному полю и распространялись в основном от геомагнитного экватора. Для этого события установлена заметная корреляция амплитуды ОНЧ волн с вариациями продольной компоненты геомагнитного поля. Аналогичные геомагнитные пульсации наблюдались и на Земле.

Анализ поляризации сигнала в наземных наблюдениях позволил оценить возможное положение областей, откуда ОНЧ волны распространялись к Земле, и таким образом ограничить возможное положение области генерации квазипериодические излучений.

Работа А.Г. Демехова и А.С. Никитенко поддержана РФФИ (грант № 19-52-50025_ЯФ_а).

ОДНОВРЕМЕННЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ОНЧ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА СПУТНИКАХ VAN ALLEN PROBES И НА ЗЕМЛЕ

Титова Е.Е.[1,2], Демехов А.Г.[1,3], Маннинен Ю.[4], Любчич А.А.[1], Никитенко А.С.[1]

[1] *ПГИ, г. Апатиты, Россия, lena.titova@gmail.com*
[2] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия,*
[3] *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия.*
[4] *Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия*

ОНЧ-излучения часто характеризуются периодической или квазипериодической модуляцией интенсивности волн с периодами от нескольких секунд до минут. ОНЧ-излучения с периодами менее 10 с, называемые периодическими эмиссиями (PE) [Helliwell, 1965], изучались в основном в наземных экспериментах. Мы впервые представляем результаты наблюдений PE в экваториальной области магнитосферы, полученные на спутнике Van Allen Probe A (VAP-A). Эти сигналы также наблюдались наземными станциями Каннуслехто в Северной Финляндии и Ловозеро на Кольском полуострове.

PE регистрировались одновременно на Земле и на спутнике VAP-A (L = 5,9-5,5) в диапазоне частот 1,4-1,7 кГц вблизи верхней частоты КНЧ шума, полоса частот которого соответствовала положительным инкрементам циклотронной неустойчивости, рассчитанным по измерениям холодной и горячей плазмы, включающим питч-угловые распределения электронов в диапазоне энергий 10^{-2} -10^{3} кэВ. Спектральная форма элементов не изменялась со временем, что говорит о компенсации эффектов линейной дисперсии групповой скорости при циклотронном взаимодействии свистовых волн с энергичными электронами.

Используя многокомпонентные данные спутника VAP-A, мы проанализировали направления векторов Пойнтинга и углы волновых нормалей свистовых волн, формирующих периодические излучения, по отношению к геомагнитному полю. Были определены периоды PE и задержки между элементами, зарегистрированными на Земле и на спутнике VAP-A.

Период PE на спутнике VAP-A был около 2 с и оставался практически постоянным на всем интервале наблюдений длительностью более часа. Период PE на спутнике соответствовал однократному времени распространения свистовой волны между сопряженными областями ионосферы. Период PE на Земле в начале события составлял около 4 с и соответствовал времени двухскачкового распространения свистовой волны между областями ионосферы. Ближе к концу события период PE на Земле резко уменьшился до 2 с, т.е. сравнялся с периодом, измеренным на спутнике VAP-A.

Уменьшение вдвое периода PE, наблюдаемое на Земле, можно ожидать при пассивной синхронизации мод в магнитосферном циклотронном мазере. Этот механизм, предложенный П. А. Беспаловым [1984], объясняет генерацию PE с периодом, кратным времени распространения свистовой волны между сопряженными областями ионосферы. Результаты анализа направлений векторов Пойнтинга на борту спутника и задержек между элементами PE на Земле и на VAP-A согласуются с этим механизмом.

Работа поддержана Государственным заданием АААА-А18-118012490100-7 Полярного геофизического института и грантом РФФИ 19-02-00179.

ОСОБЕННОСТИ ВОЗБУЖДЕНИЯ ХОРОВ ПОСРЕДСТВОМ BPA МЕХАНИЗМА В МАГНИТОСФЕРНЫХ ВОЛНОВОДАХ ПЛОТНОСТИ С РЕФРАКЦИОННЫМ ОТРАЖЕНИЕМ

Беспалов П.А.[1], **Савина О.Н.**[2]

[1]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, peter@ipfran.ru*
[2]*НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрены особенности реализации механизма пучкового усиления импульсов (Beam-Pulse-Amplifier BPA) свистовых волн в магнитосферных волноводах плотности с рефракционным отражением. Вытянутые вдоль магнитного поля волноводы с шириной порядка 100 - 300 км часто имеют место после магнитных возмущений в утренней и дневной магнитосфере за плазмопаузой, где при тех же условиях происходит возбуждение хоровых излучений. Проанализированы дисперсионные характеристики свистовых излучений в планарном волноводе в условиях выполнения WKB приближения и рефракционного отражения от "стенок". Для волноводов уплотнения (разрежения) показано, что у первых десяти мод на частотах ниже (выше) половины электронной гирочастоты могут быть выполнены условия возбуждения дискретных спектральных элементов с углами волновой нормали к магнитному полю менее 20 градусов. Величина усиления шумовых импульсов с указанными углами волновой нормали всего на 20% меньше, чем в однородной плазме под оптимальным углом около 39 градусов. Предложенная модель объясняет возможность возбуждения посредством BPA механизма хоровых излучений со сравнительно небольшими углами волновой нормали. Установлено, что как интенсивности, так и типичные углы волновой нормали могут существенно отличаться в нижней и верхней полосах возбуждения хоров.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-02-00206А,

РАССЕЯНИЕ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ УГЛОМ ВОЛНОВОЙ НОРМАЛИ НА ПРОВОДЯЩЕМ ЦИЛИНДРЕ В УСЛОВИЯХ ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЫ

Широков Е. А.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, evshirok@gmail.com

Получено точное аналитическое решение задачи рассеяния плоской волны резонансной части свистового диапазона частот на идеально проводящем бесконечно длинном круговом цилиндре, параллельном внешнему магнитному полю, в холодной однородной плазме. Рассмотрение проводилось для произвольного (но допустимого дисперсионными свойствами среды) угла падения этой волны. Неоднородностью плазмы вблизи цилиндра и столкновительным затуханием пренебрегалось.

Были найдены и проанализированы соответствующие поля и сечения рассеяния. Показано, что если угол волновой нормали падающей волны не слишком близок к резонансному, то рассеяние квазиизотропное. Если, однако, падающая волна имеет квазиэлектростатический характер, то в терминах энергии происходит ярко выраженное прямое рассеяние.

ОСОБЕННОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПУЧКА ИЗЛУЧЕНИЯ СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА, ПАДАЮЩЕГО НА НОЧНУЮ ИОНОСФЕРУ СВЕРХУ

Мизонова В.Г. [1], **Беспалов П.А.** [2]

[1]*НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Нижний Новгород, Россия, vermiz@mail.ru*
[2]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрена задача о численном расчете пространственной зависимости пучка излучения свистового диапазона, падающего на ночную ионосферу сверху. Для расчетов использованы совместно метод коллокаций решения граничной задачи, матричный алгоритм приближенного решения волновых уравнений в плавно неоднородной плоскослоистой плазме и метод быстрого преобразования Фурье по горизонтальным координатам. Проанализированы особенности пространственного распределения волнового поля при различных характеристиках падающего излучения. Вычислены доли энергии излучения, отраженной от верхней границы ионосферы и дошедшей до земной поверхности. Сопоставлено волновое электрическое поле на высоте 400 км, пространственное распределение поперечного магнитного поля и поляризации излучения вблизи поверхности Земли. Полученные результаты важны для сопоставления свойств КНЧ/ОНЧ излучений, наблюдаемых на спутниках и на Земле.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-02-00206А.

РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С ПАКЕТАМИ ЭМИЦ ВОЛН

Грач В.С.[1], Демехов А.Г.[1,2], Ларченко А.В.[2]

[1] *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, vsgrach@ipfran.ru*

[2] *ПГИ, г. Апатиты, Россия*

В работе рассматривается взаимодействие релятивистских электронов с пакетами электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн. Волновые пакеты соответствуют возмущению, наблюдаемому на спутнике RBSP-B 14 сентября 2017 года. Возмущение длилось около 120 с. С помощью разработанного ранее алгоритма выделения дискретных элементов на динамических спектрах выделены 31 элемент (волновой пакет) и определены эволюция их амплитуд и частот. Все волновые пакеты имели малые углы распространения по отношению к геомагнитному полю и повышающуюся во времени частоту выше гирочастоты ионов He^+ (от 0,8 до 2,5 Гц), максимальная амплитуда достигала 1,5 нТл. Рассматривается дипольная модель геомагнитного поля (L=5,2÷5,6), концентрация плазмы в рассматриваемой области N=30÷60 см$^{-3}$, учитывается наличие тяжёлых ионов (ионы He^+ и O^+, с концентрацией до 10 % концентрации электронов). Предполагается, что волновые пакеты генерируются в окрестности экватора. Распространение пакетов вдоль геомагнитного поля моделируется таким образом, что в месте расположения спутника частотный и амплитудный временной профили пакета соответствуют наблюдаемым, а при дальнейшем распространении пакеты затухают вследствие поглощения на ионах He^+. Резонансное взаимодействие анализируется на основе численного решения уравнений движения частиц в заданном поле волнового пакета (метод пробных частиц).

Расчеты проведены для нескольких уединённых волновых пакетов (с наибольшими значениями амплитуды, при которых возможно нелинейное взаимодействие), а также для двух пакетов с различными частотами и амплитудами, перекрывающихся во времени и/или пространстве. В случае двух пакетов, амплитуда одного пакета достаточно высока для нелинейного взаимодействия, а амплитуда второго пакета меньше, поэтому динамика высыпаний практически полностью определяется пакетом с большей амплитудой.

Показано, что для рассматриваемых волновых пакетов в результате взаимодействия может наблюдаться эффективное высыпание в конус потерь частиц с энергиями 1,5÷9 МэВ. Для определенных значений энергии (2÷5 МэВ, в зависимости от частотного профиля пакета и временного интервала) поток может быть близок к предельному потоку, соответствующему случаю сильной диффузии. Наибольшие потоки соответствуют режиму взаимодействия, в котором нелинейные эффекты приводят к увеличению питч-угла частиц с начальным питч-углом вблизи конуса потерь (3,5°) и таким образом блокируют высыпания этих частиц, но при этом происходит эффективное высыпание в линейном режиме с питч-углов в диапазоне 10°÷30°. Захват частиц полем волны имеет место при больших питч-углах, однако напрямую не приводит к попаданию частиц в конус потерь, т. к. в связи с малой длиной пакетов (длина пакета меньше или сравнима с размером зоны резонансного взаимодействия) изменение питч-угла в результате захвата недостаточно велико. При этом для некоторых значений энергии захват вносит существенный вклад в формирование потока в конус потерь, перемещая частицы в ту часть функции распределения по питч-углам, из которой возможны высыпания в линейном режиме.

Работа В.С. Грач поддержана Российским научным фондом, проект № 19-72-10111.

КИНЕТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СВИСТОВЫХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В ПЛАЗМЕ ВДОЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ.

Н. С. Артеха[1], Д. Р. Шкляр[2]

[1]*Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва, Россия, natalya.arteha@mail.ru*
[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Исследование резонансного взаимодействия свистовых волн, распространяющихся вдоль внешнего магнитного поля, с энергичными электронами в линейном приближении детально исследовано в предположениях, что плотная компонента плазмы, определяющая дисперсию волны, является «холодной», а инкремент (декремент) волны намного меньше ее частоты. Это подразумевает, что плотность энергичной компоненты плазмы, определяющей инкремент волны, мала и не влияет на дисперсию волн. Эти условия, однако, не всегда оказываются выполненными. Например, в хвосте магнитосферы, где часто наблюдаются продольные свисты, разделение плазмы на холодную и энергичную компоненты достаточно условно, а инкременты волн не слишком малы по сравнению с частотой [1]. Вычисление инкремента волны в этом случае требует развития нового подхода по сравнению с теми, которые обычно используются для решения этой задачи. В настоящей работе для случая продольного распространения свистовых волн получена линейная система уравнений для поля и функции распределения электронов, которая аналогична системе уравнений, описывающей затухание (усиление) ленгмюровских волн в изотропной плазме [2]. Это, однако, не дает решение задачи в интересующем нас случае, когда функция распределения электронов задана не аналитически, а численно, на основе измеренных дифференциальных потоков частиц. Дело в том, что наиболее последовательный подход к решению упомянутой выше системы уравнений, предложенный в работе Ландау [2], основан на методе преобразования Лапласа и включает аналитическое продолжение функции распределения частиц в комплексную плоскость скоростей. Ясно, что в случае численного задания функции распределения частиц такое аналитическое продолжение невозможно, и в этом случае необходим другой подход, который и представлен в докладе. Развиваемый подход вначале опробован на оцифрованных функциях распределения, для которых дисперсионное соотношение, включая инкремент волны, хорошо известны. Затем этот подход использован для вычисления инкремента волн по функциям распределения энергичных частиц, измеренным на спутниках Van Allen Probes.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект №19-02-00179_а.

1. Grigorenko, E. E., Malykhin, A. Y., Shklyar, D. R., Fadanelli, S., Lavraud, B., Panov, E. V., et al. (2020). 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
2. Ландау, Л. Д. (1946). О колебаниях электронной плазмы. ЖЭТФ, 16, 574.

РОЛЬ СИГНАЛОВ НАЗЕМНЫХ ОНЧ ПЕРЕДАТЧИКОВ В ДИНАМИКЕ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ

Лужковский А.А.[1,2], **Шкляр Д.Р.**[1,2]

[1]*МФТИ, г. Москва, Россия, luzartyom@yandex.ru*

[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия.*

В настоящей работе исследовано резонансное взаимодействие энергичных электронов радиационных поясов Земли с монохроматическими сигналами наземных ОНЧ передатчиков. В рассматриваемой нами области магнитосферы Земли ОНЧ диапазон (3-30 кГц) соответствует свистовым волнам. Основным упрощением, которое мы используем, является предположение о дактированном распространении свистовых волн. В этом случае направление волнового вектора $\boldsymbol{k}$ всюду близко к направлению внешнего магнитного поля Земли $\mathbf{B_0}$, а резонансное взаимодействие с электронами происходит только на первом циклотронном резонансе при условии, что продольная скорость частицы $v_{||}$ близка к резонансному значению $v_R = (\omega - \omega_c)/k$. Мы полагаем, что сигнал ОНЧ передатчика заполняет всю силовую трубку, а его амплитуда, которая зависит только от координаты s вдоль лучевой траектории, совпадающей с силовой линией геомагнитного поля, определяется уравнением

$$\frac{\partial}{\partial s}\left(\sigma v_g U\right) = 2\gamma\sigma U, \qquad (1)$$

где U - плотность энергии волны, пропорциональная квадрату ее амплитуды, v_g - групповая скорость, σ - сечение лучевой трубки, а γ - инкремент волны. В случае, когда все эти величины зависят только от координаты s, что имеет место в случае линейного инкремента, уравнение (1) легко решается, по крайней мере, численно, и определяет амплитуду волны вдоль лучевой траектории. Сложность данной задачи состоит в том, что в рассматриваемом случае нелинейный инкремент волны является нелокальным функционалом профиля амплитуды волны, так что уравнение (1) является интегро-дифференциальным уравнением. Для его решения и определения амплитуды волны мы используем метод последовательных приближений, считая, что инкремент определяется нерелятивистскими электронами. В нулевом приближении, отвечающем $\gamma = 0$, амплитуда волны определяется геометрическими факторами, а именно, групповой скоростью и сечением лучевой трубки. В первом приближении, учитывая геометрические факторы, мы полагаем равенство инкремента волны линейному вдоль траектории сигнала. Решая уравнение (1), мы получаем новый профиль амплитуды волны, необходимый для вычисления нелинейного инкремента и определения профиля волны в следующем приближении. Конечная цель работы - исследование динамики релятивистских электронов в полученном таким образом поле волны, которое для релятивистских электронов уже считается заданным. В случае неустойчивой плазмы амплитуда свистовой волны оказывается асимметричной относительно экватора, так что в полушарии, где располагается ОНЧ передатчик, амплитуда волны меньше, чем в противоположном. Это приводит к тому, что захваченные по фазе резонансные частицы, которые движутся навстречу волне и захватываются в противоположном по отношению к передатчику полушарии, значительно увеличивают свою энергию при взаимодействии с сигналом передатчика.

Таким образом, в случае неустойчивой плазмы, малая доля захваченных по фазе энергичных электронов вследствие резонансного взаимодействия с монохроматическим дактированным сигналом ОНЧ передатчика существенно увеличивает свою кинетическую энергию. Указанный эффект, наряду с другими механизмами, может приводить к появлению частиц релятивистских энергий в радиационных поясах Земли.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-02-00179.

ФОРМИРОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ЭЛЕКТРОНОВ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ

Шустов П.И., Артемьев А.В., Васько И.Ю., Петрукович А.А., Юшков Е.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, p.shustov@gmail.com

В представленной работе исследуется динамика спектров электронов, при конвекции частиц из дальнего плазменного слоя к Земле. Мы используем одновременные наблюдения спектров электронов тремя аппаратами THEMIS на разных радиальных расстояниях в хвосте магнитосферы. Спутниковые наблюдения вблизи экваториальной плоскости сопоставлены с моделью адиабатического нагрева электронов при конвекции к Земле. В рамках этой модели произведены оценки потери электронов, необходимые для воспроизведения наблюдаемых спектров. Дальнейшее сравнение модели и наблюдаемых спектров позволяет сделать вывод, что потери горячих (> 1 кэВ) электронов должны достигать придела сильной диффузии или даже превосходить его, что говорит о необходимости эффективного расширения конуса потерь электронов за счёт продольных электрических полей. Также в докладе рассматриваются возможные механизмы потерь электронов и их роль в формировании наблюдаемых спектров.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Викторов М.Е.[1], Голубев С.В.[1], Мансфельд Д.А.[1], Шалашов А.Г.[1], Господчиков Е.Д.[1], Eliasson B.[2], Speirs D.C.[2], Phelps A.D.R.[2], Bingham R.[2], Ronald K.[2]

[1]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mikhail.viktorov@appl.sci-nnov.ru*
[2]*Университет Стратклайда, г. Глазго, Великобритания*

Кинетические неустойчивости неравновесной плазмы, удерживаемой в открытых магнитных ловушках, играют определяющую роль в происхождении различных типов радиоизлучений в космической плазме, например, в магнитосферах Земли и планет, Солнца и некоторых типов звезд. В работе проведено теоретическое и экспериментальное исследование генерации в плотной магнитоактивной плазме двух типов волн в разных диапазонах частот: свистовые волны на частотах ниже электронной гирочастоты и электростатические волны на гармониках электронной гирочастоты. На экспериментальном стенде в ИПФ РАН проведено детальное исследование тонкой структуры динамических спектров с использованием сверхширокополосных осциллографов с полосой пропускания до 59 ГГц. На основе численных расчетов проведен анализ механизмов возбуждения волн, а также исследованы особенности спектров излучения. Проведено сопоставление экспериментальных и теоретических данных.

РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СГУСТКОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ГАЗАМИ И ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМОЙ

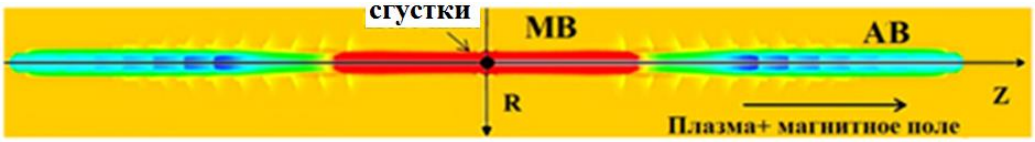
Тищенко В.Н.[1)], Багаев С.Н.[1)], Березуцкий А.Г.[1)], Бояринцев Э.Л.[1)], Грачев Г.Н.[1)], Дмитриева Л.Р. [1,2)], Захаров Ю.П.[1)], Зецер Ю.И.[3)], Мирошниченко И.Б.[1,2)], Посух В.Г.[1)], Пономаренко А.Г.[1)], Смирнов А.Л.[1)], Чибранов А.А.[1,2)], Шайхисламов И.Ф.[1)].

1) - ИЛФ РАН, г. Новосибирск, Россия, tvn25@ngs.ru; 2) - НГТУ, г. Новосибирск, Россия.
3) ИДГ РАН, Москва, Россия

В докладе представлен обзор исследований, выполненных в рамках предложенного в ИЛФ СО РАН направления – резонансное взаимодействие периодических сгустков плазмы с газами и замагниченной плазмой. Резонанс проявляется при определенном соотношении между параметрами сгустков и окружающей среды. В резонансе периодические выбросы взрывного типа, например, сгустки лазерной плазмы, генерируют в окружающей среде низкочастотную волну, длина которой линейно зависит от количества сгустков и содержит ~ 60 % их энергии.

В газах сгустки плазмы в фокусе импульсно-периодического лазерного излучения с высокой частотой повторения ~100 кГц создают интенсивный ультра и инфразвук. КПД преобразования намного превосходит традиционные методы амплитудной модуляции или генерации разностной частоты. В лабораторных экспериментах ИЛФ СО РАН и ИТПМ СО РАН продемонстрирована оперативная перестройка спектра в инфра- ультразвуковом диапазоне частот и возможность разработки удаленного точечного источника инфразвука. Также продемонстрировано снижение в ~2 раза аэродинамического сопротивления тела при зажигании пульсирующей лазерной плазмы в сверхзвуковом набегающем потоке.

В замагниченной плазме показано формирование низкочастотных волновых пакетов, высокочастотного излучения и струй плазмы, которые переносят вдоль магнитной силовой трубки энергию, импульс и вращательный момента импульса и содержат до ~80 % вложенной энергии. Протяженность структуры линейно зависит от количества сгустков, а радиус определяется энергии единичного сгустка. Численные расчеты, подтвержденные лабораторными опытами на стенде КИ-1, показали, что достигаемая интенсивность, энергия и длина пакетов недостижимы другими известными способами. Волновые пакеты могут создаваться в широком диапазоне параметров геомагнитной плазмы, а найденные критерии резонансного взаимодействия позволяют масштабировать результаты исследований и управлять типом генерируемых волн. Возможны такие сочетания как Альфвеновская (переносит вращательный момент); Альфвеновская + медленная магнитозвуковая (переносит продольный импульс сжатия); Альфвеновская + магнитозвуковая + вистлеры. При определенных условиях генерируется с большим КПД только высокочастотное вистлерное излучение.



Периодические сгустки в замагниченной плазме, генерирующие медленную магнитозвуковую (MB) и альфвеновскую (AB) волны.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания № АААА-А17-117021750017-0 при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 22.

ШИРОКОПОЛОСНАЯ СВИСТОВАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ В КАВЕРНЕ ПЛОТНОСТИ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ С ПРОДОЛЬНЫМ ТОКОМ

Зудин И.Ю., Гущин М.Е., Айдакина Н.А., Коробков С.В., Стриковский А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, zudiniy@ipfran.ru

Задачи, связанные с мониторингом геофизической обстановки в ионосфере и магнитосфере, защиты космических аппаратов от волновой и корпускулярной радиации требуют, в частности, понимания механизмов генерации электромагнитного излучения в околоземной плазме. Настоящая работа посвящена эффекту генерации широкополосного шума, возникающего при протекании тока вдоль каверны плотности замагниченной плазмы. Указанный эффект наблюдался в лабораторных экспериментах, выполненных на крупномасштабном плазменном стенде «Крот». Возбуждение тока, протекающего по плазме, а также формирование каверны производилось с помощью вводимого в плазму электрода, на который подавалось положительное относительно стенок вакуумной камеры высокое напряжение. В работе обсуждаются условия, при которых развивается электромагнитная неустойчивость, в том числе пороговый ток, при котором начинается генерация; исследуется спектральный состав возбуждаемых шумов и их пространственная структура. На основании полученных результатов делается вывод о том, что эффект генерации, скорее всего, не связан с резонансным взаимодействием типа «волна-частица», но представляет собой специфическую токовую неустойчивость [1]. Подобные явления наблюдаются в авроральной ионосфере в кавернах плотности плазмы, развивающихся в условиях суббури [2].

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 19-19-00501.

[1] Зудин И.Ю., Гущин М.Е., Айдакина Н.А. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2021. Т. 113, вып. 2, с. 96.
[2] Knudsen D.J., Kabirzadeh R., Burchill J.K., et. al // J. Geophys. Res. 2012. V. 117, A02217.

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ «КОНТИНУУМ» ИЗЛУЧЕНИЯ

Могилевский М.М.(1), Романцова Т.В.(1), Чугунин Д.В.(1), Чернышов А.А.(1), Моисеенко И.Л.(1), Кумамото А. (2), Касахара Й. (3), Цичия Ф. (2).

(1) Институт космических исследований РАН, Россия.

(2) Университет Тохоку, Япония.

(3) Университет Каназава, Япония.

"Континуум" излучение (КР) - электромагнитное радиоизлучение в диапазоне частот от нескольких килогерц до нескольких сотен килогерц регистрируемое во внутренней магнитосфере Земли. Механизм генерации этого излучения связывают с энергичными частицами радиационных поясов, захваченных в магнитную ловушку и осциллирующих между полушариями. Для изучения КР мы использовали измерения на японском спутнике ERG, который был запущен в 2016 году на приэкваториальную орбиту и продолжает работать в настоящее время.

Анализ измерений показал, что на дневной стороне внутренней магнитосферы наблюдаются электромагнитные поля с линейчатым спектром. При пересечении спутником плоскости Z = 0 происходит изменение поляризации излучения, что указывает на расположение источников этих полей.

На ночной стороне внутренней магнитосферы регистрируются излучения с линейчатым спектром в диапазоне частот 600 - 1 600 кГц, которые наблюдаются на значительных расстояниях от плоскости Z = 0, до нескольких радиусов Земли. В работе проводится сравнение двух типов излучений и обсуждаются возможные механизмы их генерации.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобра 075-15-2020-780.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ МЕЖДУ ЭНТРОПИЙНЫМИ И МЕДЛЕННЫМИ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИМИ ВОЛНАМИ В ПЛАЗМЕ С ТЕПЛОВЫМ ДИСБАЛАНСОМ

Завершинский Д.И.[1,2], **Колотков Д.Ю.**[3,4], **Молевич Н.Е.**[1,2], **Рящиков Д.С.**[1,2], **Белов С.А.**[1,2]

[1] *Самарский университет, г. Самара, Россия, dimanzav@mail.ru*
[2] *СФ ФИАН, г. Самара, Россия*
[3] *University of Warwick, Coventry, UK*
[4] *Институт солнечно-земной физики, СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Магнитогазодинамические волны различного типа, наблюдаемые в корональной плазме, не редко демонстрируют поведение, которое существенно отличается от прогнозов предлагаемых современными моделями. Подобный результат может быть обусловлен рядом причин. В частности, это может быть связано с неполнотой данных и неполнотой или некорректным учетом процессов, определяющих динамику волн в среде. Одним из таких, процессов, чье влияние на динамику волн в солнечной атмосфере на данный момент еще недостаточно хорошо изучено, является тепловой дисбаланс между неопределенным процессом нагрева солнечной короны и радиационным охлаждением. По причине того, что мощности процессов нагрева и охлаждения зависят от термодинамических параметров плазмы, волны могут нарушать тепловой баланс и может реализовываться обратная связь(как положительная, так и отрицательная) между волнами и средой. Ко всему прочему, процессы нагрева и охлаждения существенно меняют дисперсионные свойства волн, приводя к зависимости фазовой скорости и инкремента/декремента от длины волны(частоты) возмущения. Однако как показано в данной работе, ко всему прочему процессы нагрева и охлаждения определяют, как энергия инициированного возмущения распределится между модами его определяющими.

Распределение энергии было получено на основе точного аналитического решения линейного эволюционного уравнения, описывающего одномерную эволюцию возмущения в корональной петле в приближении бесконечного большого магнитного поля. В качестве основных управляющих параметров были использованы два характерных времени, которые определяются зависимостью функции нагрева и радиационного охлаждения от температуры и плотности. В качестве иллюстрации было выбрано изобарическое возмущение в форме Гауссовой функции. Основными модами, определяющими возмущение в указанных приближениях, являются две медленных магнитоакустические моды и одна энтропийная волна. Зависимость отношения приходящейся на энтропийную и магнитоакустические волны является нелинейной функцией, однако, на ее основе можно сделать следующий вывод. В том случае, когда оба характерных времени, связанных с тепловым дисбалансом, существенно превышают значение характерного времени пробега магнитоакустической волны вдоль петли, то отношение энергии между энтропийной и магнитоакустическими волнами стремится к конечному значению. В то время, как в противоположном случае практически вся энергия приходится на магнитоакустические волны.

Как результат, наблюдаемые скоротечные затухания бегущих медленных волн (SUMER-осцилляции), могут быть обусловлены тем, что не вся энергия приходилась на них во время инициализации. И таким образом, при разделении начального возмущения амплитуда отделившихся медленных волн может быть ниже предсказываемой теорией, не учитывающей тепловой дисбаланс среды.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2020-0014 и АААА-А19-119083090053-9) и грантом РФФИ № 20-32-90018.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО ДИСБАЛАНСА И КОНЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ МАГНИТНОЙ ТРУБКИ НА ДИСПЕРСИОННЫЕ СВОЙСТВА МЕДЛЕННЫХ ВОЛН

Белов С.А., Молевич Н.Е., Рящиков Д.С., Завершинский Д.И.,

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, mr_beloff@mail.ru

Наличие в плазме процессов радиационного охлаждения и неадиабатических процессов нагрева, зависящих от параметров среды, может приводить к тому, что любое возмущение этих параметров может приводить к нарушению теплового баланса, которое в свою очередь может оказать влияние на вызвавшее его возмущение. Таким образом, при возникновении теплового дисбаланса возникает положительная или отрицательная обратная связь между возмущением и средой. Подобная обратная связь приводит к усилению или затуханию волн, а также к дисперсии их фазовой скорости. В то же время к дисперсии волн приводит наличие некоторых характерных размеров задачи, например, радиуса магнитной трубки.

В приближении тонкой трубки второго порядка с учетом теплового дисбаланса получено линейное уравнение, описывающее динамику магнитоакустических возмущений малой амплитуды. Из полученного уравнения выведено дисперсионное уравнение. Данное дисперсионное уравнение решено аналитически для случая бегущих волн. С помощью аналитического решение произведены оценки влияния теплового дисбаланса и конечной толщины магнитной трубки на дисперсионные свойства медленных магнитоакустических волн для условий веерных корональных петель, встречающихся в активных областях Солнца. Показано, что для данных условий в низкочастотном пределе фазовая скорость медленных волн определяется воздействием теплового дисбаланса, а в высокочастотном пределе – конечной шириной трубки, в то же время декремент волн преимущественно определяется воздействием теплового дисбаланса.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2020-0014 и АААА-А19-119083090053-9) и грантом РФФИ № 20-32-90018.

ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОГО ДИСБАЛАНСА НА ИНДУЦИРОВАННОЕ АЛЬФВЕНОВСКОЙ ВОЛНОЙ ПРОДОЛЬНОЕ ВОЗМУЩЕНИЕ ПЛАЗМЫ

Белов С.А., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И., Рящиков Д.С.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, mr_beloff@mail.ru

Тепловой дисбаланс, вызванный возмущением параметров плазмы, может приводить к положительной или отрицательной обратной связи между возмущением и средой. В частности, наличие подобное обратной связи может приводить к усилению или затуханию магнитоакустических волн и дисперсии их фазовой скорости. В то же время альфвеновские волны в линейном приближении не подвержены действию теплового дисбаланса. Однако в нелинейном приближении линейно поляризованные альфвеновские волны способны индуцировать продольное возмущение плазмы, благодаря пондеромоторной силе, связанной с градиентом магнитного давления в волне. Данное возмущение может испытать влияние теплового дисбаланса.

Получено уравнение, описывающее генерацию продольного возмущения плазмы альфвеновской волной в случае теплового дисбаланса. Для случая синусоидальной альфвеновской волны получено аналитическое выражение для продольного возмущения плазмы. Показано, что в случае теплового дисбаланса в решении появляется неосциллирующее слагаемое. Также наблюдается зависимость амплитуды осциллирующей части решения от частоты индуцирующей волны. Кроме того, осциллирующая часть оказывается сдвинутой по фазе по сравнению со случаем без теплового дисбаланса. Также произведено численное моделирование генерации продольного возмущения плазмы и сравнение с аналитическим решением для корональных параметров.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2020-0014 и АААА-А19-119083090053-9) и грантом РФФИ № 20-32-90018.

КРУТИЛЬНЫЕ ВИСТЛЕРЫ, СОЗДАВАЕМЫЕ СГУСТКОМ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННОМ ФОНЕ.

Березуцкий А.Г., Тищенко В.Н., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б., Шайхисламов И.Ф.,

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, a.berezuckiy@yandex.ru

В экспериментах на стенде КИ-1 и расчетах на суперкомпьютерах показано, что сгустки лазерной плазмы могут генерировать в силовой трубке замагниченной плазмы (далее – фон) интенсивные вистлеры, магнитное поле которых достигает ~20 % от магнитного поля фона. При этом возможен вистлер, спектр которого содержат линии вблизи нижнегибридной частоты и в десятки раз более высоких частотах. Эффект наблюдается при резонансном взаимодействии сгустков с фоном, когда ионно-плазменная длина фона превышает значение $L_{pi} > 0.5$. При $0.3 < L_{pi} < 0.4$ в силовой трубке возбуждаются одновременно три типа волн – вистлеры, альфвеновская и магнитозвуковая волны, в диапазоне $L_{pi} < 0.3$ - альфвеновская и магнитозвуковая волны. В работе приводятся экспериментальные результаты по генерации вистлерных волн сгустками лазерной плазмы в замагниченной плазме (далее – фон). Крутильные вистлеры характеризуются азимутальной компонентой магнитного поля с правосторонней круговой поляризации, распространяющиеся со скоростями V~300 км/с. Рисунок 1 иллюстрирует осциллограмму компоненты магнитного поля $B_\varphi(t)$. Результаты экспериментов показали, что магнитные возмущения имеют правостороннюю круговую поляризацию и имеют характерную понижающуюся частоту от 10^6 Гц в начале пакета до $2\cdot10^5$ Гц в конце.

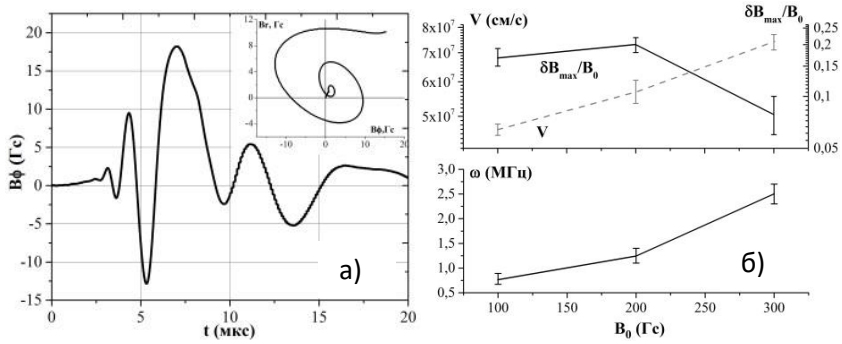


Рисунок 1 а) Азимутальное магнитное поле Bφ (t). На вставке представлен годограф магнитного поля. Расстояние z=140 см от мишени. Внешнее магнитное поле B_0=100 Гс. б) Зависимость скорости V, максимальной амплитуды $\delta B_{max}/B_0$ и частоты возмущений ω от величины внешнего магнитного поля.

Зависимость амплитуды, скорости и периода вистлеров от внешнего магнитного поля, иллюстрирует рисунок 1 (б). Максимальная амплитуда вистлеров $\delta B_{max}/B_0$=0.24 достигается в поле B_0=200 Гс. При B_0=300 Гс, величина δB_{max} резко уменьшается, что связано с изменением концентрации фона за счет сжатия внешним магнитным полем и уменьшения L_{pi}. Скорость распространения возмущений показывает практически линейную зависимость от величины магнитного поля. Частота возмущений ω=0.76 МГц в поле 100 Гс, 1÷1.25МГц при 200 Гс и 2.5 МГц в поле 300 Гс соответственно.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания №АААА-А17-117021750017-0 при частичной поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 22. Параллельное компьютерное моделирование было выполнено на суперкомпьютерах МСЦ РАН, НГУ, ССКЦ СО РАН.

1. V. N. Tishchenko, A. G. Berezutskii, E. L. Boyarintsev, Yu. P, et al. Quantum Electron., 47:9 (2017), 849–852

2. P.A. Prokopov, Yu.P. Zakharov, V.N. Tishchenko, et al. 2016. Solar-Terrestrial Physics, 2016. Vol. 2. Iss. 1, pp. 19–33.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ УНЧ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ОТ МАГНИТНЫХ ДИПОЛЕЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА НИЖНЕЙ И ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦАХ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОГО ВОЛНОВОДА ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА .

Ермакова Е.Н., Рябов А.В., Котик Д.С.

НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия, l.ermakova@nirfi.unn.ru

В работе на основе численного кода, разработанного авторами, построены и проанализированы особенности спектров магнитных полей в КНЧ диапазоне, распространяющихся в горизонтально неоднородном волноводе земля –ионосфера от источника типа горизонтальный магнитный диполь.. Для расчетов использованы результаты статьи [1] и методика расчета поверхностного импеданса неоднородной ионосферы, развитая в работе [2], позволяющая проводить вычисления для любых профилей ионосферных параметров, для любого наклона магнитного поля земли и учитывать взаимодействие нормальных волн в ионосфере. Кроме амплитудных спектров, анализировались фазовые и поляризационные спектры магнитного поля. Как было показано в работе [3] модель однородного волновода не может объяснить все особенности амплитудных и поляризационных спектров искусственных сигналов от токовых горизонтальных линий. В настоящей работе вычисления проведены с учетом горизонтально-неоднородной ионосферы, изменения наклона магнитного поля и путевого угла вдоль всей трассы распространения н/ч волн. Горизонтальная неоднородность ионосферы задавалось либо профилями ионосферных параметров по модели IRI-2016, либо эти профили корректировались заданием модельных спорадических слоев Es, имеющих разную интенсивность, разную высотную протяженность и разную протяженность вдоль геодезической линии. Численные расчеты показали, что учет изменений ионосферных параметров и путевых параметров не привел к значительному изменению амплитудных и поляризационных спектров в дневное время: разность фаз между магнитными компонентами и поляризационный параметр были близки к нулю также, как и в модели однородного волновода. Но ситуация изменилась в темное время суток, когда спектры магнитного поля сигнала формировались под влиянием ионосферного резонатора суб-ИАР. Сдвиг фазы между компонентами достигал 15-20^0. При этом сдвиг фазы и степень эллиптичности сигнала нарастали с увеличением расстояния до приемного пункта. Наиболее заметная разница в характере амплитудных спектров магнитных компонент и большие фазовые сдвиги до (40^0) наблюдались при прохождении терминатора через геодезическую линию, соединяющую источник и приемник. Также задание спорадических слоев, имеющих разную интенсивность вдоль трассы распространения УНЧ полей, существенно меняло форму амплитудных спектров магнитных компонент. Влияние резонаторов суб-ИАР, имеющих на нижней границе спорадические слои разной интенсивности, на продольную и поперечную компоненты проявлялось в разной степени, поэтому частоты, на которых наблюдалась максимальная амплитуда в разных компонентах, могли отличаться. Это приводило также к росту эллиптичности принимаемых сигналов. Учет изменения путевого угла вдоль геодезической линии позволил получить соотношение магнитных компонент С-Ю и В-З, близкое к наблюдаемым в экспериментах с Кольской установкой в 2001 г.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, проект № 18-42-520035. Расчеты и анализ влияния горизонтально неоднородных Es слоев на спектры сигнала выполнены при поддержке гранта РНФ № 20-17-00050.

1. Кириллов В.В., Копейкин В.Н. // Изв. ВУЗов. Радиофизика 2002. Т. 46. № 1. С.
2. Ermakova, E.N., Kotik, D.S., Polyakov, S.V. and A. V. Shchennikov. //Radiophysics and Quantum Electronics 2007.V. 50. №. 7. P. 555–569.
3. Ермакова Е.Н., Рябов А.В., Котик Д.С.// Изв. ВУЗов. Радиофизика 2020, в печати.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЛОКАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА АМПЛИТУДУ И ПОЛЯРИЗАЦИЮ УНЧ МАГНИТНОГО ШУМА НА ЧАСТОТАХ ПЕРВОГО ШУМАНОВСКОГО РЕЗОНАНСА

Ермакова Е.Н., Рябов А.В.

НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия, l.ermakova@nirfi.unn.ru

Как известно, шумановский резонанс (ШР) возникает в полости земля ионосфера под действием молниевых разрядов и имеет глобальный характер. В [1] на основе численных расчетов (без учета формирования шумановского резонанса) показано, что влияние локальной ионосферы может быть существенным и на частотах шумановских резонансов. В настоящей работе экспериментально исследовано влияние локальной ионосферы, а именно ионосферного альвеновского резонатора (ИАР) и нижнего ионосферного резонатора на высотах 80-300 км (суб-ИАР) на амплитуду и поляризацию первого шумановского резонанса. Исследования были выполнены на основе спектрального анализа данных одновременного мониторинга на среднеширотной станции Новая Жизнь (НЖ, 56^0 с.ш., 46^0 в.д.) и низкоширотной станции, находящейся в Мицпе-Рамон (Израиль, МР, 30.61°с.ш, 34.80°в.д.). Как известно, поляризация, н/ч магнитных полей в полосе первого шумановского резонанса в северном полушарии имеет преимущественно левую поляризацию. И это подтверждают данные мониторинга обеих низкочастотных обсерваторий. Но степень эллиптичности на более низкоширотной станции и абсолютные значения поляризационного параметра ε существенно меньше, чем на станции НЖ. Обнаружено, что на станциях в темное время суток наблюдаются значительные вариации в спектре ε на частоте первого ШР. Причем эти вариации имеют разный характер: в приемном пункте НЖ наблюдались изменения степени эллиптичности без изменения характера поляризации, в то время, как на станции МР характер поляризации мог меняться и преобладало право поляризованное излучение. Анализ суточной динамики параметра ε показал, что эти вариации связаны с влиянием локальных резонаторов суб-ИАР, имеющих разную оптическую толщину и добротность на этих обсерваториях. Обнаружено, что влияние суб-ИАР на поляризацию в полосе ШР наиболее значительно, когда граничная частота (частота, на которой меняется характер поляризации магнитного шума) близка к частоте ШР. Влияние ИАР на поляризацию и амплитуду магнитных полей в частотной полосе первого шумановского резонанса было обнаружено только на среднеширотной станции НЖ: высокодобротный альвеновский резонатор в ионосфере над этим пунктом мог приводить к уширению или уменьшению частотной полосы ШР, к смещению его центральной частоты, а также к кажущемуся расщеплению его частоты. Анализ данных разнесенной регистрации с базами 100-400км также обнаружил влияние локальных резонаторов при горизонтально неоднородной ионосфере на амплитуду и поляризации магнитных полей на частотах ШР. На станции МР влияние ИАР на поляризацию и амплитуду ШР не обнаружено, из-за более узкой частотной полосы, в которой регистрируется РСС (резонансная структура спектра). Анализ спектров азимутального угла вектора магнитного поля на частотах ШР показал, что локальные ионосферные резонаторы в зависимости от своей добротности могут изменять значения этих углов на $5\text{-}15^0$. Авторы благодарны проф. Университета Тель-Авива Колину Г. Прайсу за предоставленные данные с низкочастотного пункта в Мицпе-Рамон.

Работа выполнена по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-42-520035-р_поволжье_а.

1. E. N. Ermakova, D. S. Kotik, A. V.Pershin, V. A.Pilipenko, and K. Shiokawa. // Radiophysics and Quantum Electronics 2017. V. 59, No. 12. P. 947.

ДИНАМИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ ДИСКРЕТНЫХ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ОНЧ-ИЗЛУЧНИЙ («ПТИЧКИ»)

Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Федоренко Ю.В., Никитенко А.С., Громова Л.И., Турунен Т.

ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kleimen@ifz.ru

Рассмотрены особенности динамических спектров дискретных ОНЧ излучений на частотах выше 4-5 кГц, известных как «птички», на основе анализа данных ОНЧ наблюдений в Финляндии на станции Каннуслехто (КАН, $L \sim 5.5$) и российской обс. Ловозеро (ЛОВ) ~ 400 км восточнее. Регистрация этих колебаний стала возможной лишь после применения цифровой фильтрации, очищающей записи ОНЧ от интенсивных атмосфериков. Представлена большая коллекция разнообразных спектральных форм «ОНЧ птичек», которые, как правило, представляют собой короткие (1-3 мин) всплески право-поляризованных волн. Наиболее часто наблюдаются ОНЧ всплески с повышающейся или понижающейся частотой в полосе 4-8 кГц, при этом возможна также генерация волн одновременно в двух, и даже трех, узких частотных полосах. Рассмотрены как короткие (несколько мин) серии ОНЧ всплесков, так и длительные (до 10 ч) серии сигналов с изменяющимся со временем спектром. Показаны «ОНЧ птички» с очень сложным многополосным динамическим спектром и с элементами квазипериодичности. Кроме того, обнаружены узкополосные монохроматические сигналы, напоминающие линию, состоящую из отдельных периодически повторяющихся точек. Сопоставление одновременных ОНЧ наблюдений в КАН и ЛОВ показало, что ионосферные размеры области выхода обсуждаемых волн относительно небольшие, и сигналы могут приходить на эти станции с разных направлений. Установлено, что «ОНЧ птички» наблюдаются преимущественно в дневное время, чаще в магнитно-спокойных условиях после геомагнитных возмущений. Излучения регистрируются на частотах много выше половины экваториальной электронной гирочастоты на $L \sim 5.5$, т. е. значительно выше .Вполне вероятно, что «ОНЧ птички» генерируются глубоко в магнитосфере на значительно меньшей L-оболочке за счет циклотронной неустойчивости электронов радиационного пояса. Разнообразие динамических спектров излучений показывает наличие значительных различий в пространственно-временной динамике резонансных электронов как возможного источника «ОНЧ птичек».

ПЛАНИРУЕМЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ОРБИТЕ ВОКРУГ ЛУНЫ. ПРОЕКТ «ЛУНА-26».

Куликов С.В.[1], Климов С.И.[1], Савин С.П.[1], Стяжкин В.А.[2], Заруцкий А.А.[4], Скальский А.А.[1], Сантолик О.[3], Колмашова И.[3], Лан Р.[3]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kulikov@rx24.ru*

[2]*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

[3]*ИАФ, г. Прага, Чехия*

[4]*ЦФП ИОФ РАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

Луна не обладает внутренним глобальным магнитным полем, но на ее поверхности существуют очаги аномальной намагниченности коры [1]. Также у Луны нет значительной атмосферы способной защитить ее поверхность от набегающего потока протонов солнечного ветра. Таким образом, в результате взаимодействия солнечного ветра с лунной поверхностью возникает множество интересных для электромагнитного исследования феноменов, таких как обратное рассеяние поверхностью Луны протонов солнечного ветра, формирование мини-магнитосфер над областями аномальной намагниченности, перенос протонов с дневной стороны Луны в хвост, а также связанная с этими явлениями значительная волновая активность в окружающей плазме [2].

Приборы ЛПМС-ЛГ (система трехкомпонентных феррозондовых магнитометров) и ЛЕМРА-Л (анализатор длинноволнового электромагнитного излучения) на борту аппарата «Луна-26» предоставят возможность электромагнитного мониторинга окололунной плазмы на низких орбитах (порядка 50 км).

1. Coleman P.J., Schubert G., Russel C.T., Sharp L.R. Satellite measurement of the moon’s magnetic field: A preliminary report // The Moon. 1972. V. 4. P. 419-429.

2. Bhardwaj A., Dhanya M.B., Alok A., Barabash S. A new view on the solar wind interaction with the Moon // Geoscience Letters 2015.

ЭМИЦ ВОЛНЫ И ПРОТОННЫЕ ВЫСЫПАНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ДРЕЙФОМ ЭНЕРГИЧНЫХ ПРОТОНОВ В ВЕЧЕРНЕМ СЕКТОРЕ

Т.А. Попова[1], А.Г. Яхнин[1], А.Г. Демехов[1,2], А.А. Любчич[1], A. Matsuoka[3], K. Asamura[4], Y. Miyoshi[5], S. Yokota[6], S. Kasahara[7], K. Keika[7], T. Hori[5], F. Tsuchiya[8], A. Kumamoto[8], Y. Kasahara[9], M. Shoji[10], I. Shinohara[3], H. Kim[11], S.J. Noh[11]

[1] *ПГИ РАН, г. Апатиты, Россия, tarkada@yandex.ru*
[2] *ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия*
[3] *Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan*
[4] *Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, Kanagawa, Japan*
[5] *Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan*
[6] *Osaka University, Osaka, Japan*
[7] *Kanazawa University, Kanazawa, Japan*
[8] *Tohoku University, Tohoku, Japan*
[9] *The University of Tokyo, Tokyo, Japan*
[10] *Nagoya University, Nagoya, Japan*
[11] *New Jersey Institute of Technology, New Jersey, USA*

В работе представлены результаты исследования электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн и связанных с ними высыпаний энергичных протонов во время развития суббури. Для анализа события 01 декабря 2018 года в интервале времени 16-17 UT использовались данные трех магнитосферных спутников Arase (ERG), Van Allen Probes (VAP) A и B. В ночном секторе спутник VAP-A зарегистрировал почти бездисперсионную инжекцию энергичных протонов, связанную с началом суббури. Затем протонная инжекция была последовательно зарегистрирована спутниками VAP-B и ERG как дисперсионное увеличение потока энергичных протонов. Такое увеличение потока протонов на каждом спутнике совпадает с появлением или усилением ЭМИЦ волн в измерениях того же спутника. Эти данные показывают, что возбуждение ЭМИЦ волн происходит сначала внутри области суббури, а затем и вне нее за счет дрейфа облака инжектированных протонов. Низкоорбитальные спутники NOAA/POES и MetOp наблюдали высыпания энергичных протонов вблизи области сопряженности с наблюдениями ЭМИЦ волн в магнитосфере. Используя параметры регистрируемых волн, плазмы и фонового магнитного поля, были рассчитаны коэффициенты питч-угловой диффузии протонов и индекс режима диффузии. Резонансные энергии максимумов коэффициентов диффузии хорошо согласуются с диапазоном энергий наблюдаемых протонных высыпаний. Значения коэффициентов диффузии указывают на режим сильной диффузии, что согласуется с равенством захваченных и высыпающихся потоков протонов на околоземной орбите. Расчеты коэффициента усиления волн, использующие данные измерений плазмы и магнитного поля на спутниках VAP и Arase, показали, что исследуемые ЭМИЦ волны могли быть сгенерированы в области их наблюдения или в непосредственной близи к ней.

Работа Т.П., А.Я., и А.Д. проводилась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), проект № 19-52-50025.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В ПЕРИОДЫ ПОВЫШЕННОЙ МАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Фейгин Ф.З., Хабазин Ю.Г.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, feygin@ifz.ru

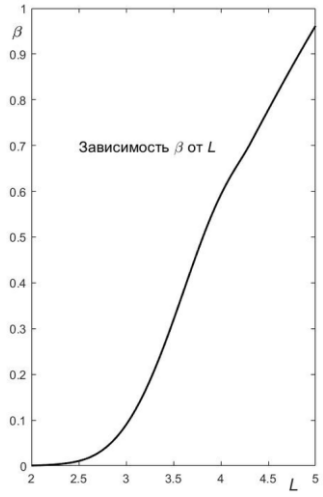
Обычно считается, что в спокойных магнитных условиях в протонном радиационном поясе давление энергичных анизотропных протонов (~ 100 Кэв) много меньше магнитного давления (т.е. $\beta = 8\pi n_h T/B_0^2 \ll 1$). Это условие было положено в основу теоретического анализа механизма генерации ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных волн в форме Pc1 пульсаций (или «жемчужины»). Однако в работе [Berko et al., 1975] было обнаружено, что в области 4–6 радиусов Земли, где генерируются и откуда распространяются "жемчужины", давление плазмы может быть повышенным и даже равным давлению геомагнитного поля. На левом рисунке представлена зависимость β от L для протонов с энергией ~ 100 Кэв во время магнитной бури 17–20 июня 1972 года по данным спутника Explorer 45 (S3-A). Как видно из рисунка, в магнитосфере Земли возможны периоды, когда давление горячей протонной плазмы близко к давлению магнитного поля. По-видимому, такая геофизическая ситуация характерна для периодов повышенной магнитной активности.

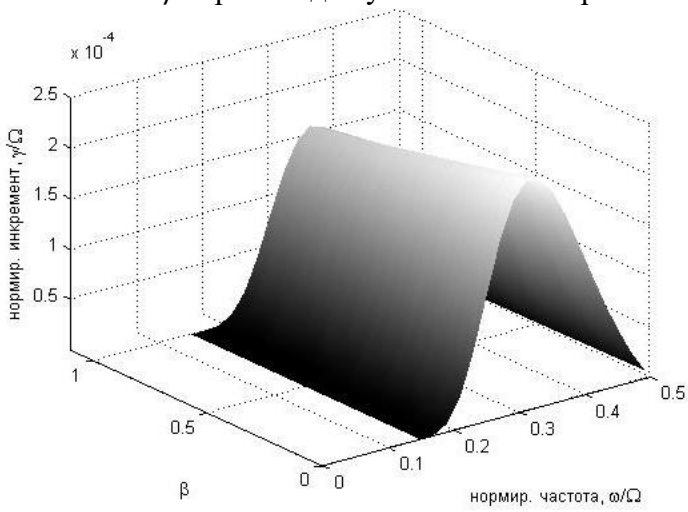
На основе дисперсионного уравнения УНЧ волн, распространяющихся вдоль магнитного поля [Шафранов, 1963], получаем выражение для инкремента:

$$\frac{\gamma}{\Omega} = \pi^{1/2}\frac{n_h}{n_0}\frac{\alpha\, e^{-\alpha^2}\left[A - x/(1-x)\right](1-x)^2}{x(2-x) + (n_h/n_0)\left[1 + (1-x)(A+1)/2\alpha^2\right]}, \qquad (1)$$

здесь $x = \omega/\Omega$ — частота волны, нормированная на гирочастоту ионов,

$\alpha = (\Omega - \omega)/k_{\|}(2T_{\|}/m)^{1/2}$, $A = (T_{\perp}/T_{\|} - 1)$ — анизотропия. Правый рисунок показывает зависимость нормированного инкремента γ/Ω от нормированной частоты ω/Ω для разных значений β при постоянных $v_{\|h}/c_A = 2.5$, $n_h/n_0 = 10^{-3}$ и $A = 1$. Анализ этого результата позволяет сделать вывод, что при уменьшении β происходит увеличение инкремента.





Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Шафранов В.Д., Сборник "Вопросы теории плазмы", вып. 3. Госатомиздат, 1963.

Berko F.M., Cahill I.J., Jr Fritz T.A., Protons as the prime contributors to storm time ring current // J. Geophys. Res. V. 80, 3539, 1975.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН НА НОВЫЙ 25 ЦИКЛ С ПОМОЩЬЮ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМО МОДЕЛИ И ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Сафиуллин Н.Т., Поршнев С.В., Клиорин Н.И.

Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, Россия, n.t.safiullin@urfu.ru

Мы прогнозируем динамику солнечной активности с помощью нелинейной одномерной динамо-модели и феноменологического уравнения эволюции чисел Вольфа (числа солнечных пятен). Нелинейность модели связана с эволюцией мелкомасштабной магнитной спиральности и приводит к усложненному характеру солнечной активности. При этом учитываются алгебраическая и динамическая составляющие нелинейности альфа-эффекта. Исходная модель основана на балансе мелкомасштабной и крупномасштабной магнитной спиральностей, которая описывает в деталях процесс образования солнечных пятен за последние пять циклов активности (начиная с 1964 г.), адаптированная для более широкого класса магнитных проявлений солнечной активности. Полученная система уравнений была решена численно [1], при этом эта динамо-модель была откалибрована по длительным рядам наблюдений солнечных пятен.

Уравнение эволюции чисел Вольфа основано на механизме формирования магнитных пятен в результате нестабильности отрицательного эффективного магнитного давления [2], и описывает процесс формирования и затухания солнечных пятен. Эта неустойчивость перераспределяет магнитный поток, созданный механизмом динамо среднего поля. Такой подход позволяет синтезировать среднемесячные числа Вольфа [3].

Применение искусственных нейронных сетей архитектуры типа NARX (Nonlinear AutoRegressive with eXogenous input) позволяет надстроить над синтезированным временным рядом среднемесячных чисел Вольфа помесячный прогноз с достаточно высокой точностью числа солнечных пятен с ассимиляцией новых поступающих наблюдений. Но даже в отсутствии корректирующих наблюдений, прогнозирующая система, в основе которой лежат численные расчеты динамо-модели, оказывается устойчивой и позволяет проводить долгосрочный прогноз.

Согласно последним данным наблюдений, 2020 год был подтвержден как начало нового 25-го цикла солнечной активности. В связи с этим представляет интерес, как будет выглядеть этот новый 25-й солнечный цикл с точки зрения построенной прогнозирующей системы. Результаты прогноза среднемесячного ряда чисел Вольфа показывают, что новый цикл будет по форме достаточно близким к предыдущему, а пик активности будет немного выше, примерно на 15-20%.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-52-53045 ГФЕН_а, и при частичной поддержке Российского научного фонда, проект № 18-12-00131.

1. Kleeorin Y., Safiullin N., Kleeorin N., et al. // Month. Not. Roy. Astron. Soc. 2016. V. **460 (4).** P. 3960
2. Kleeorin N., Rogachevskii I. and Ruzmaikin A. // Sov. Astron. Lett., **15**, 274, 1989
3. Safiullin N., Kleeorin N., Porshnev S., et al. // J. Plasma Phys. 2018. V. **84**. P. 735840306

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДИКИ СРЕДНЕСРОЧНОГО ПРОГНОЗА МАГНИТНЫХ БУРЬ С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

М.Л. Фридман[1], О.В. Хабарова[2], О.В. Мингалев[3]

[1]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия,* lapinbank@gmail.com

[2]*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия,* habarova@izmiran.ru

[3] *Полярный геофизический институт, Апатиты,* mingalev_o@pgia.ru

На данный момент проблему краткосрочного прогноза магнитных бурь можно считать в целом решенной. Между тем, среднесрочные прогнозы геомагнитных бурь с заблаговременностью от 3 часов до 3 дней отличаются низкой оправдываемостью по сравнению с краткосрочными (иногда их оправдываемость не выше 40%, https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/u30/Max%20Kp%20and%20GPRA.pdf) и требуют значительного улучшения. Проблема заключается в подходе: среднесрочный прогноз обычно базируется на методике, хорошо работающей для реализации краткосрочного прогноза, а именно, на анализе состояния солнечного ветра, типичного для магнитных бурь. При этом данные получаются из 1-й Лагранжевой точки с неким опережением по отношению ко времени прихода геоэффективного потока к магнитосфере, что дает фору в 20-60 минут. Однако для среднесрочного прогноза этого мало и требуется использование принципиально другого подхода, позволяющего предсказывать приход геоэффективных потоков, а не описывать состояние солнечного ветра по факту. Это обстоятельство указывает на необходимость поиска процессов в солнечном ветре, предшествующих геомагнитным бурям. Известно, что магнитные полости, заполненные магнитными островами и токовыми слоями, образуются перед высокоскоростными потоками любого типа, что может рассматриваться как предвестник магнитных бурь (Khabarova et al., 2015, 2016, 2018; Adhikari et al., 2019). В связи с этим был проведен анализ вариаций плотности солнечного ветра в ULF-диапазоне в 1-й точке Лагранжа, наблюдаемых от нескольких часов до нескольких дней до прибытия геоэффективного потока. Факт возникновения предбуревых ULF-вариаций в солнечном ветре и даже геомагнитном поле был замечен давно (Khabarova 2007; Khabarova & Yermolaev, 2007). Предварительный анализ предвестников давал хорошие результаты, однако проблема автоматизации прогноза и его применения к текущим данным солнечного ветра оставалась открытой.

В докладе обсуждаются новые результаты разработки метода среднесрочного прогноза магнитных бурь, который использует рекуррентную нейронную сеть (РНС) для автоматического поиска паттернов. Минутные данные плотности солнечного ветра и данные оконного преобразования Фурье используются в качестве входного параметра. Идет работа по улучшению прогноза в результате добавления анализа данных по токовым слоям (по базе данных токовых слоев на 1 а.е., см. https://csdb.izmiran.ru) . Тестовый результат прогнозирования представлен на сайте.

МОДУЛЬ ПРОГНОЗА ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ЦЕНТРА КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НИИЯФ МГУ

Шугай Ю.С., Калегаев В.В., Бобровников С.Ю., Нгуен М.Д., Ширяев А.О.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, jshugai@srd.sinp.msu.ru

На сайте космической погоды НИИЯФ МГУ (http://swx.sinp.msu.ru/weather.php) реализован единый сервис среднесрочного прогноза скорости, плотности и кинетической температуры протонов квазистационарных потоков солнечного ветра (СВ), учитывающий изменения параметров модели прогноза в минимуме солнечного цикла.

Прогноз среднесрочных значений скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра (ВСП СВ) реализован на основе эмпирической модели, использующей величины площадей корональных дыр, рассчитанные по изображениям Солнца с КА SDO/AIA в двух длинах волн 19,3 и 21,1нм. Для прогноза скорости медленных потоков СВ в режиме реального времени был выбран метод, основанный на использовании параметров СВ на 1а.е. за предыдущий и текущий оборот Солнца, позволяющий получить результаты, сопоставимые по качеству с другими прогнозами медленных потоков СВ. Для оценки плотности и кинетической температуры протонов СВ использованы эмпирические соотношения, приведенные в работе [1], которые построены в предположении, что через внутреннюю границу, расположенную на 30 солнечных радиусах, радиальный момент плотности потока СВ постоянный, а также постоянно газовое давление. Эмпирическая модель использует значения спрогнозированной скорости квазистационарных потоков солнечного ветра на 30 солнечных радиусах, а также, в качестве коэффициентов модели, максимальные значения скорости, плотности и кинетической температуры (http://swx.sinp.msu.ru/weather.php).

Была создана база данных событий прихода ВСП СВ на околоземную орбиту по данным измерений параметров СВ на космических аппаратах [2] и на основе прогноза ВСП СВ, получаемого из анализа солнечных изображений. База данных содержит события за период 2010-2019 годов (http://swxdev.sinp.msu.ru/models/hss.php?gcm=1). Полученные данные планируется использовать для оценки качества прогноза ВСП СВ, именно: вероятности правильного прогноза прихода ВСП, и определения временной погрешности (интервала между моментом прихода ВСП по измерениям на космических аппаратах и по прогнозу).

Были построены синоптические карты источников ВСП СВ на основе изображений с SDO/AIA, собранных за полный Каррингтоновский оборот Солнца, с нанесенными на них контурами корональных дыр, за период с 2010 по 2019 годы. База данных синоптических карт доступна по адресу https://ftp.sinp.msu.ru/coronal_maps/90/. Синоптические карты позволят визуально отслеживать на Солнце размеры и расположение корональных дыр, источников ВСП СВ, в течение каждого оборота Солнца, и наблюдать за их динамикой с ходом солнечного цикла.

1. Odstrcil, D., and V. J. Pizzo, // J. Geophys. Res. 1999. V.104(A12). P. 28225–28239.
2.Rodkin D. G. et al. // Cosmic Res. 2019. V. 57, No. 1, P. 53–63.

МЕТОД ИНС В ЗАДАЧЕ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ИНДЕКСОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Крашенинников И.В., Чумаков С.О.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, krash@izmiran.ru

Для работы радиотехнических систем с использованием ионосферного распространения радиоволн, в частности, планирования выбора рабочих частот, необходимо знание индексов солнечной активности, как ключевых управляющих параметров прогностических ионосферных моделей. Долгосрочный прогноз условий прохождения радиоволн охватывает временной интервал от одного месяца до 3-4 лет вперед и, следовательно, он и определяет потребность в горизонте определения временного хода уровня солнечной активности.

В настоящее время есть два базовых официальных источника прогнозных значений для параметров солнечной активности: европейский центр анализа числа солнечных пятнен (среднемесячные сглаженные - Rm) - http://sidc.oma.be/silso/datafiles и американский центр космической погоды для потока солнечного радиоизлучения (среднемесячные сглаженные - F10.7m) - https://www.swpc.noaa.gov/products/predicted-sunspot-number-and-radio-flux. Как две независимо измеряемые характеристики одного процесса они должны коррелировать, что и проявляется в исторических рядах данных. Однако при экстраполяции вперед они существенно расходятся уже на масштабе 2-х лет в силу принципиально различающихся методов построения долгосрочного прогноза и возникает потребность более корректного прогнозирования среднемесячных индексов Rm и F10.7m на одной математической основе, в частности, на основе инструмента искусственного интеллекта - искусственной нейронной сети (ИНС) [1].

В данной работе представлены результаты анализа особенностей применения метода ИНС в задаче долгосрочного прогнозирования на примере индекса солнечной активности – числа солнечных пятен (SSN). Рассматривались базовые вопросы устойчивости и общей корректности предсказания данного индекса на временном масштабе цикла солнечной активности в конфигурации ИНС, основные параметры которой были определены, как оптимальные, в [2]. На рис. 1 представлены результаты верификации рассматриваемого метода с применением ИНС к модельным (синтезированным) и реальным (сглаженным 13-ти месячным фильтром) данным SSN для 25-го цикла солнечной активности.

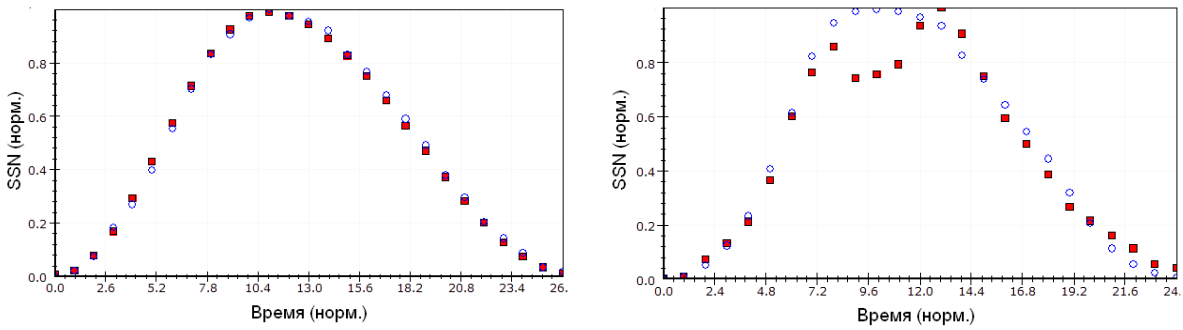


Рис. 1. Прогнозирование 25-го цикла солнечной активности по индексу – числу солнечных пятен (SSN): модельные синтезированные (левая панель) и реальные (правая панель) последовательности исторических данных – циклов сглаженных чисел Вольфа.

1. Головко В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение // М: ИПРЖР. 255 с. ISBN 5-93108-005-8. 2001.
2. Бархатов Н. А., Королёв А. В., Пономарев С. М., Сахаров С. Ю. Долгосрочное прогнозирование индексов солнечной активности методом искусственных нейронных сетей // Изв. ВУЗов. Радиофизика. Т. XLIV. № 9. Сс. 806-814. 2001.

ИЗУЧЕНИЕ ВАЖНОСТИ ВХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ АЛГОРИТМАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Владимиров Р.Д., Широкий В.Р., Мягкова И.Н., Баринов О.Г., Доленко С.А.

НИИ Ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, dolenko@srd.sinp.msu.ru

Целью исследования является изучение важности входных признаков, используемых для построения моделей машинного обучения, прогнозирующих состояние магнитосферы. В качестве прогнозируемых значений рассматриваются среднечасовые значения экваториального индекса Dst на 1-4 часа вперед [1]. В качестве входных признаков используются исторические значения характеристик солнечного ветра и межпланетного магнитного поля из первой точки Лагранжа в система Солнце-Земля и индекса Dst, а также временные характеристики, описывающие положение Земли относительно Солнца. Каждый параметр, кроме временных характеристик, описывается 25 среднечасовыми значениями: текущим и 24 историческими значениями за час до текущего, два часа до текущего и так далее.

Для оценки важности входных признаков использовался итеративный подход на основе алгоритмома машинного обучения, связанный с перебором моделей-кандидатов путём удаления входных признаков по одному. В данной работе в качестве алгоритма машинного обучения рассматривается линейная регрессия. Общая схема работы алгоритма выглядит следующим образом:

1) Обучается модель машинного обучения на данных с полным набором из n входных признаков, и производится оценка качества модели на тестовом наборе.

2) Каждый признак по очереди удаляется из набора данных.

3) На каждом из n уменьшенных наборов производится обучение модели машинного обучения, и производится оценка изменения точности по сравнению с моделью, полученной на шаге 1.

4) Признак, удаление которого приводило к минимальному падению качества по сравнению с остальными моделями, полученными на шаге 3, полностью удаляется из набора.

5) Повторяем алгоритм, начиная с шага 1, используя полученный на шаге 4 набор в качестве полного. Повторяем до тех пор, пока не останется последний признак.

6) Считается, что признаки ранжированы по важности в порядке, обратном порядку удаления: самый важный признак остается последним.

По результатам работы наиболее важными оказались следующие признаки: Dst(0), B_z(1), H_den(0), B_magn(1), H_den(3), SW_spd(2), где Dst – значение индекса Dst, B_z и B_magn – значения z-компоненты и модуля межпланетного магнитного поля, соответственно, H_den – плотность протонов в солнечном ветре, SW_spd – скорость солнечного ветра, в скобках указана задержка в часах относительно текущего момента.

В работе проводится анализ и обсуждение результатов и перспектив использования алгоритма для задач прогнозирования состояния магнитосферы Земли.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик НИИЯФ МГУ 6.1 (01201255512) и 2.1 (115041410195).

1. Ефиторов А.О., Мягкова И.Н., Широкий В.Р., Доленко С.А. Прогнозирование Dst-индекса, основанное на методах машинного обучения. Космические исследования, 2018, т.56, №6, с.353-364.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГЕОМАГНИТНЫХ ДАННЫХ НА БАЗЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ

Воробьев А. В.[1,2], **Пилипенко В. А.**[2,3]

[1] УГАТУ, г. Уфа, Россия, [2]ГЦ РАН, г. Москва, Россия, [3]ИФЗ РАН, г. Москва, Россия,
geomagnet@list.ru

Множественные аномалии во временных рядах геомагнитных данных, регистрируемых наземными станциями, помимо того, что негативно сказываются на эффективности самого подхода к наблюдению геомагнитного поля (ГМП), исключают возможность применения к данным такого рода математического аппарата, требующего соблюдения условия непрерывности информационного сигнала, и создают ощутимые проблемы как при моделировании геопространственного распределения вариаций ГМП, и получение информации высокого уровня (L2). Перспективным подходом к решению данной проблемы может являться создание и интеграция в процесс сбора геомагнитных данных так называемых «цифровых двойников» (ЦД) магнитных станций, позволяющих с известной точностью симулировать поведение их физических прототипов. На примере сети высокоширотных магнитометров IMAGE рассматривается подход к созданию ЦД магнитных обсерваторий, а также анализируется его эффективность в задачах восстановления и ретроспективного прогноза геомагнитных данных. Приводятся результаты численного и компьютерного моделирования указывающие на то, что использование ЦД магнитных станций способно минимизировать ряд проблем и ограничений, связанных с наличием выбросов и пропущенных значений во временных рядах больших объемов геомагнитных данных, а также обеспечивает возможность восстановления и ретроспективного прогноза параметров ГМП в авроральной зоне со среднеквадратической ошибкой до 11.5 нТл. При этом, важно отметить, что если в амплитудной области информационного сигнала возможны незначительные отклонения, соразмерные с ошибкой моделирования, то пространственная локализация частотных пакетов с периодами 2–12 мин (диапазон Pi3/Ps6 пульсаций) остается практически неизменной. На примере минутных геомагнитных данных станции Kilpisjärvi (KIL) за 2015 г показано, что использование ее ЦД способно обеспечить восстановление и ретроспективный прогноз 99.55% данных за 2015 г, при этом 86.73% из них со среднеквадратической ошибкой, не превышающей 12 нТл. Также в работе предлагается модель интеграция ЦД в процессы сбора и регистрации геомагнитных данных, способная обеспечить возможность автоматической идентификации и замещения отсутствующих значений и выбросов, повышая таким образом за счет эффекта резервирования отказоустойчивость магнитной станции как источника данных. Возможным приложением метода ЦД может быть восстановление пропущенных среднечасовых значений в базе данных OMNI по наземным данным, используя установленные корреляционные связи между параметрами межпланетного пространства и различными типами геомагнитных возмущений.
Работа поддержана грантом РНФ № 16-17-00121.

О КУМУЛЯТИВНОЙ ПРИРОДЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СОБЫТИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ. Оценка достоверности результатов

Козлов В.И.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера, СО РАН, г. Якутск, cosmoprognoz@mail.ru

Получены свидетельства того, что природа наиболее экстремальных событий Космической погоды имеет общее, **кумулятивное** происхождение: как результат взаимодействия «догоняющих» (в среде с *убывающей* «раз за разом» плотностью) друг друга ударных волн. Это подтверждается данными прямых наблюдений взаимодействия ударных волн от серии CME на космических аппаратах США, *Stereo-A* и *Stereo-B*. В *экстремальных* по мощности событиях Космической погоды образуются и *наибольшие* по величине потоки «**штормовых**» частиц, **предваряющих** *приход ударной волны на орбиту Земли*. Именно они представляет *наибольшую опасность* для систем жизнеобеспечения в верхней атмосфере, в Космосе и на Земле. Проведена *заверка результатов* прогноза «штормовых» частиц по космическим лучам высоких энергий данными измерений на космическом аппарате США, *ACE*. Оценка *достоверности* прогноза P**≥80**%.

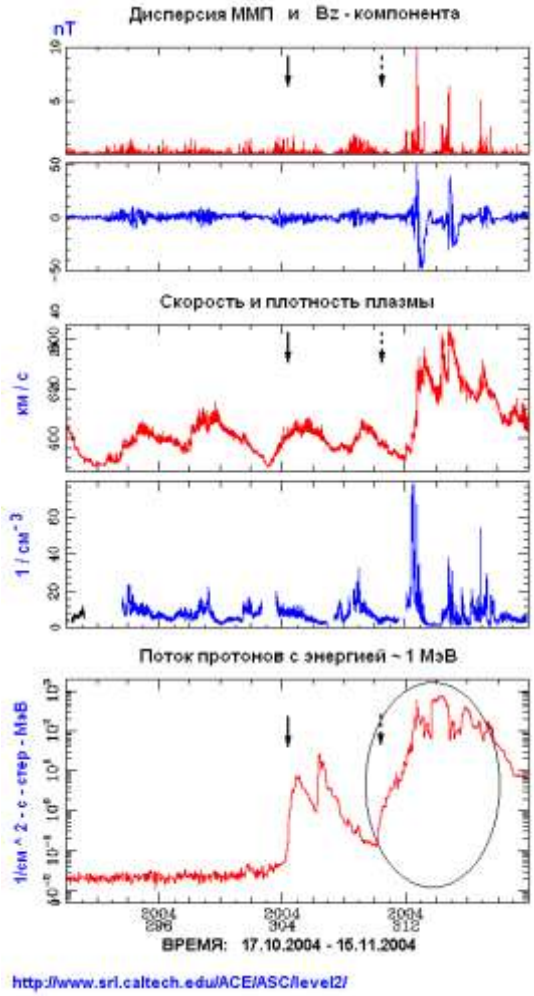


Рис. 1. Дисперсия и Bz-компонента межпланетного магнитного поля, скорость и плотность плазмы солнечного ветра, а также поток «**штормовых**» частиц - низкоэнергичных протонов (на примере частиц с энергией **~1** МэВ), по данным измерений на космическом аппарате США, *ACE* с 17.X.2004-15.XI.2004. **Предвестники** – показаны вертикальными **стрелками**.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ С ПОМОЩЬЮ DBM-МОДЕЛИ И МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Капорцева К.Б., Шугай Ю.С., Еремеев В.Е., Калегаев В.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия kb.kaportceva@physicss.msu.ru

В настоящее время становится всё более актуальной задача прогнозирования прихода на орбиту Земли корональных выбросов массы (КВМ) – проявлений солнечной активности, ответственных за наиболее мощные геомагнитные возмущения. КВМ наблюдаются в солнечной короне с помощью коронографов (например, SOHO/LASCO), а их плазменные параметры можно зарегистрировать в межпланетном пространстве приборами на комических аппаратах, например, ACE, DSCOVR, в точке L1. При регистрации КВМ по плазменным параметрам в межпланетном пространстве принято называть их межпланетными корональными выбросами массы (МКВМ). Установить однозначное соответствие между КВМ и МКВМ удается не всегда, вследствие невозможности проследить распространение КВМ в гелиосфере и результаты возможного взаимодействия КВМ с другими потоками солнечного ветра во время их распространения от Солнца. В нашей работе для прогнозирования времени и скорости прихода КВМ мы используем автоматически пополняемые базы данных параметров КВМ CACTus [1] (на основе данных коронографа LASCO/SOHO) и диммингов SolarDemon [2] (на основе данных SDO/AIA), с помощью которых мы отбираем потенциально геоэффективные КВМ, учитывая положение события на солнечном диске. В результате алгоритмов объединения и фильтрации событий мы получили базу данных потенциально геоэффективных КВМ за период с 2010 – 2019 гг.

Прогнозирование времени и скорости прихода КВМ на орбиту Земли осуществлялось с помощью DBM-модели [3], которая определяет закон движения выброса в заданном фоновом ветре, и модели прогноза высокоскоростных потоков (ВСП) солнечного ветра [4], которая позволяет рассчитать скорость фонового солнечного ветра в любой точке гелиосферы на основе расчета площадей корональных дыр по изображениям Солнца, полученным с космической обсерватории SDO/AIA. Чтобы учесть возможное взаимодействие ВСП и КВМ в гелиосфере, входные данные DBM-модели пересчитываются в нескольких точках гелиосферы с учетом прогноза скорости ВСП.

Были рассчитаны модельные значения скорости и времени прихода МКВМ на околоземную орбиту для 2010, 2013, 2015 и 2017 годов и получено, что вероятность детектирования события МКВМ с точностью до 48 часов равна 70%. Сравнение проводилось с каталогом МКВМ Ричардсона и Кейна [5]. Анализ геоэффективности событий МКВМ показал, что потоки, связанные с сильными геомагнитными возмущениями (Dst индекс меньше - 100нТл), детектируются с вероятностью 80%. Анализ результатов позволил наметить пути для улучшения методов отбора геоэффективных КВМ, а также, для дальнейшего совершенствования системы прогнозирования МКВМ.

1. Robbrecht E., Berghmans D. // A&A 2004. V. **425.** P. 1097.
2. Kraaikamp E., Verbeeck C. // Space Weather Space Clim. 2015. V. **5**. P. A18.
3. Vrsnak B., Zic. T, Vrbaneck D., et al. // Solar Physics. 2013. V. **285**. P. 295.
4. Shugay Yu., Slemzin V., Rodkin D., et al // Space Weather Space Clim. 2018. V. **8**. P. A28.
5. Richardson I.G., Cane H.V. // Space Weather Space Climate. 2012. V. **2**. P A02.

Магнитосферный отклик на взаимодействие с диамагнитной структурой спорадического солнечного ветра

Пархомов В.А., Еселевич В.Г., Еселевич М.В., Дмитриев А.В., Суворова А.В., Хомутов С.Ю., Цэгмэд Б., Райта Т.

БГУ, г.Иркутск, Россия, pekines_41@mail.ru

Представлены результаты исследования движения от источника на Солнце до поверхности Земли диамагнитной структуры (ДС) солнечного ветра, являющейся частью коронального выброса массы, зарегистрированного 18.05.2013 на 1 а.е. ДС, определяемая по высокому отрицательному коэффициенту корреляции между модулем ММП и концентрацией СВ на спутниках *ACE* и *Wind* (r = - 0.9) вблизи Солнца, на спутниках *THB* и *THC* (r = - 0.9) на околоземной орбите и на спутнике *THA* внутри магнитосферы (r = - 0.4), переносится солнечным ветром до орбиты Земли с сохранением своей тонкой внутренней структуры. Диамагнитная структура проходит как целое через головную ударную волну и воздействует на магнитопаузу в виде замагниченного плазмоида, в котором концентрация ионов возрастает от 10 *см*$^{-3}$ до 90 *см*$^{-3}$, а скорость падает при движении в хвост магнитосферы. При взаимодействии ДС с магнитопузой генерируется импульсное электрическое поле величиной ~ 400 *мВ/м* с последующими колебаниями с периодом T ~ 200 *с* и амплитудой ~ 50 *мВ/м*. При этом наблюдается ускорение заряженных частиц радиационного пояса и модуляция потоков протонов в диапазоне энергий 95 – 575 *кэВ* на дневной стороне и электронов 40 – 475 *кэВ* и протонов 95 – 575 *кэВ* на ночной. На вечерней стороне магнитосферы (19 -23 MLT) наблюдается суббуревая активизация в геомагнитных пульсациях и полярных сияниях, но без магнитной отрицательной бухты. В послеполуночном секторе (01 – 05 MLT) наблюдается saw tooth суббуря без предварительной фазы и брейкапа с глубокой модуляцией ионосферного тока и аврорального поглощения. Длительность всех явлений в магнитосфере и на Земле определяется временем взаимодействия ДС с магнитосферой (~ 4 часов). Для интерпретации закономерностей магнитосферного отклика на взаимодействие с ДС рассматриваются альтернативные модели: импульсного прохождения ДС из СВ в магнитосферу и классическая модель пересоединения ММП и геомагнитного поля.

Международный индекс магнитной активности PC является индикатором энергии солнечного ветра поступающей в магнитосферуЗемли (Резолюция XXII Ассамблеи МАГА, 2013г.). В данной работе представлены результаты статистического анализа соотношений между среднегодовыми значениями PC индекса и такими показателями как индексы магнитной активности (AE и Dst), параметры солнечного ветра (скорость Vsw, плотность Nsw, динамическое давление Pdyn, вертикальная компонента ММП Bz, полная величина ММП |B|, электрическое поле *EKL*) и число солнечных пятен, CME и CIR за 23-24 циклы солнечной активности. Показано, что среднегодовые значения амплитуды спокойной суточной вариации геомагнитного поля (которая служит уровнем отсчёта при оценке величины PC индекса) изменялись в 1998-2019гг в полном соответствии с вариациями солнечногоУФ излучения (150-200нм), которое обеспечивает электрическую проводимость земной ионосферы. Годовая величина PC индекса хорошо коррелирует с годовыми величинами *Vsw* и |*B*| и их производной – электрическим полем *EKL*, так же как и с годовыми величинами *AE и Dst* индексов, что свидетельствует о том, что PC индекс действительно служит наземным индикатором поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра. Годовые величины *EKL*, *PC*, *AE*, *Dst* коррелируют с величиной межпланетного магнитного поля |*B*| значительно лучше, чем с *Bz* компонентой ММП, указывая, что эффективность взаимодействия ММП с магнитосферой определяется, прежде всего, величиной поля |*B*|, а не южной компонентой ММП B_{ZS}, что не подтверждает концепцию Данжи о пересоединении межпланетного и геомагнитного полей, как механизме возбуждения магнитосферных возмущений.

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В ПЕРВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЦИКЛЫ ЭПОХ ПОНИЖЕННОЙ СА

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия, ishkov@izmiran.ru

Завершение в декабре 2019 г. 24 цикла солнечной активности (СА) первого цикла второй эпохи пониженной СА позволяет начать рассмотрение особенностей его развития и характеристик в сравнении с первым солнечным циклом (СЦ12) первой эпохи пониженной СА. В представляемом докладе мы рассмотрим экстремальные события космической погоды, которые осуществились в эти СЦ. Появление в последнее десятилетие XX века шкалы воздействия солнечных активных событий на околоземное космическое пространство, которая позволила классифицировать их по максимальной интенсивности потока мягкого рентгеновского излучения – R (12.5-1 кэв = 1-8 Å), максимальному значению потока солнечных протонов – S и максимальному трёхчасовому значению геомагнитного индекса Кр для магнитных бурь – G в пятибалльной системе, где R5, S4, G5 относят воздействия к экстремальным.

Надо иметь ввиду, что в первую эпоху пониженной СА (СЦ 12 – 16) нам доступны достоверные (наблюдательные) данные только о геомагнитных возмущениях по трёхчасовому индексу Аа (сравнительно однородный ряд с 1868 г.), внезапных импульсах (SI), отражающих приход к Земле возмущений от солнечных вспышечных событий (солнечные вспышки и выбросы солнечных волокон, сопровождающиеся корональными выбросами вещества) и, достаточно редко, от процессов в межпланетном пространстве, и, так называемых crochèt, реакцией магнитосферы на приход электромагнитного импульса в начале взрывной фазы особо мощных солнечных вспышек.

Прошедший 24 солнечный цикл оказался самым слабым во всех видах проявления вспышечной активности и воздействия на околоземное космическое пространство по шкале возмущений по сравнению со всеми СЦ космической эры и, по всей видимости, всех СЦ достоверного ряда относительных чисел солнечных пятен.

Исследование экстремальных и очень больших геомагнитных бурь (классы G5 и G4) в солнечных циклах 24 и 12 выявило ещё одну особенность СЦ24: за весь цикл отмечено только 1 магнитная буря класса G4 и 3 – класса G3, тогда как в СЦ 12 их было 5: 3 магнитные бури класса G4 и 2 – класса G5. Этот факт может говорить о том, что физические условия реализации этих низких солнечных циклов несколько различались, т.е. фоновые значения общего магнитного поля были хоть и низкие, но различные, и, соответственно, условия реализации солнечных активных явлений, вероятно, значимо различались.

О непредсказуемости солнечной и звездной активности

Пустильник Л.А., Тель-Авивский университет

Солнечная активность и вызванные ею разрушительные состояния космической погоды являются важнейшим и, возможно, единственным, постоянно действующим факторам прямого влияния астрофизического объекта на нашу цивилизацию. Осознание этой угрозы значительной частью общества превращает проблему предсказуемости солнечной активности в социально значимую и обеспечивает поддержкой гранты, обещающие быстрый и радикальный прогресс в этой области. Процессы солнечной активности и соответсвующие вопросы к их прогнозу могут быть разделены на две группы па временному масштабу:

1. Пятенная активность: а) звездные (солнечные) циклы активности с периодами 9-14 лет (в среднем 11 лет) для Солнца и их нестабильность на масштабах сотни лет (типа минимума Маундера). Другой компонент этой активности проявляющийся на масштабах дни-недели – рождение и динамика магнитных пятен разных масштабов. Физической основой этих двух типов явлений яляется динамо-процесс генерации магнитного поля в Солнце и звездах за счет комбинации дифференциального вращения, меридиональной циркуляции, гиротропной турбулентности, магнитной плавучести и кориолисового вращения магнитных петель.
2. Вспышечное энерговыделение в солнечной (звездной) атмосфере на масштабах минуты-часы в результате аномальной диссипации всплывшего из под фотосферы магнитного поля в ходе пересоединения в турбулентных токовых слоях. Этот процесс, согласно современным представлениям, отвечает за собственно энерговыделение во вспышке, вызванное диссипацей магнитной энергии, проникающей из конвективной области в солнечную атмосферу, накапливаемую там и диссипируемую в ходе вспышек разного масштаба.

Несмотря на гигантский прогресс последних лет в глубоком понимании физических механизмов как динамо, так и диссипативного процесса, а также на гигантские достижения в технологии наблюдений за Солнцем и звездами, обусловленные возможностями космических обсерваторий (с прогрессом в пространственном разрешении до небольшой части угловые секунды и во временном разрешении до миллисекунд) мы до сих пор не можем представить себе полную причинно-следственную картину явлений в солнечной активности и сформулировать схему ("if" and ""if" and "if"…"then"...) способную обеспечить достоверный прогноз солнечной активности (как по годам, так и по часам) с достаточно высокой степенью оправдываемости. В докладе мы обсуждаем возможные причины нашей неспособности генерировать надежный прогноз и возможное наличие в причинно-следственной цепочке активности таких элементов, которые принципиально ограничивают предсказуемость солнечной активности:

1. Наличие скрытых факторов, которые сегодня нельзя наблюдать и учесть, но которые очень существенны для процесса генерации активности.
2. Наличие элементов нестабильной и непредсказуемой эволюции типа «странного аттрактора» в причинно-следственных цепочках связей, ответственных за солнечную (звездную) активность.
3. Наличие критических состояния (бифуркаций) в предвспышечной эволюции активной области с крайней чувствительностью результирующего отклика системы к малому изменению управляющих параметров, порождающего непредсказуемые фазовые переходы типа "катастрофы".

Евгений Бережко. «Отпуск это не повод не ходить на работу»

С.А. Стародубцев

ИКФИА СО РАН, г. Якутск, Россия, starodub@ikfia.ysn.ru

Доклад посвящен жизни и работе Бережко Евгения Григорьевича (15.12.1952-28.11.2020 гг.) - о детстве, учебе в ФМШ №18 и на ФизФаке МГУ, о его пути в Якутию и становлении там настоящего ученого - директора ИКФИА СО РАН им. Ю.Г. Шафера. Бережко Е.Г. (БЕГ) является одним из самых ярких и талантливых представителей Якутской школы по космофизике, исследователем астрофизики космических лучей и физики плазмы - ученого с мировым именем. Характерной его чертой было трепетное отношение к любой работе и особое внимание к тщательной постановке физической задачи. А его слова «отпуск - это не повод не ходить на работу» уже давно стали среди его учеников и коллег афоризмом. БЕГ был интересным и разносторонним человеком, с ним можно было обсуждать самые различные вопросы от рабочих моментов до сложных жизненных ситуаций.

Как-то в начале 90-х весь теоротдел, в котором под руководством БЕГа работал автор, выполнял весьма важный хоздоговор - во внеурочное время переводил с английского строительную документацию для здания «Высшей школы музыки» в Якутии». В результате 2-х месячной работы был заработан целый PC 286 «белой сборки»! С его помощью вскоре были получены новые, оригинальные результаты по ускорению космических лучей в остатках сверхновых. Одновременно американским коллегам удалось получить решение аналогичной задачи, но с сильно упрощенными параметрами и с использованием суперкомпьютерного кластера Cray. Благодаря физически обоснованной замене переменных и оригинальному алгоритму, предложенному БЕГом, метод численного решения сложной системы уравнений оказался настолько эффективным, что теоретикам ИКФИА удалось получить сопоставимые результаты на простом и медленном компьютере. Последующий доклад БЕГа на ICRC1993 в Калгари вызвал большой резонанс и был особо отмечен в докладе рапортера на заключительном заседании конференции.

Другая сторона жизни Евгения Григорьевича это его увлечение спортом - он был в курсе всех главных новостей спортивной жизни и в стране, и за рубежом. А во время отпуска часто бывал вместе со своими коллегами-теоретиками на природе – в сплавах на катамаранах в районе Ленских Столбов по реке Буотома. По инициативе БЕГа премия, полученная в 1984 теоретиками ИКФИА на конкурсе работ СО АН СССР, была потрачена на приобретение катера, на котором потом был совершен не один дальний поход по Лене.

Нужно отметить, что, при всех своих достоинствах и независимости в суждениях, сам БЕГ не стеснялся обратиться в затруднительных ситуациях за советом к коллегам, которых он искренне уважал за их профессионализм и жизненную позицию. Особенно тепло он относился к ветеранам Великой отечественной войны. Опыт общения с БЕГом оказал большое влияние на его учеников при их становлении как ученых.

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ В ИОНОСФЕРЕ. ЭКСПЕРИМЕНТ «ОБСТАНОВКА (1 ЭТАП)» НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС

Климов С.И.[1], **Грушин В.А.**[1], **Новиков Д.И.**[1], **Осадчая Л.А.**[1], **Лихтенбергер Я.**[2], **Сегеди П**[2]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия,* sklimov@iki.rssi.ru
[2]*ELTE, г. Будапешт, Венгрия*

Анализ мониторинговых измерений электрической ***E*** и магнитной ***B*** компонент, регистрируемых в эксперименте «Обстановка (1 этап) [1], позволил исследовать (правая часть Рис.1) орбитальные (3-я панель сверху) и суточные вариации частотно (0,1-25 кГц) - временных характеристик плазменно-волновых излучений в ионосфере, практически на постоянной орбите высотой 390 км, а также распределение по INV (L – параметр, 4 панель).

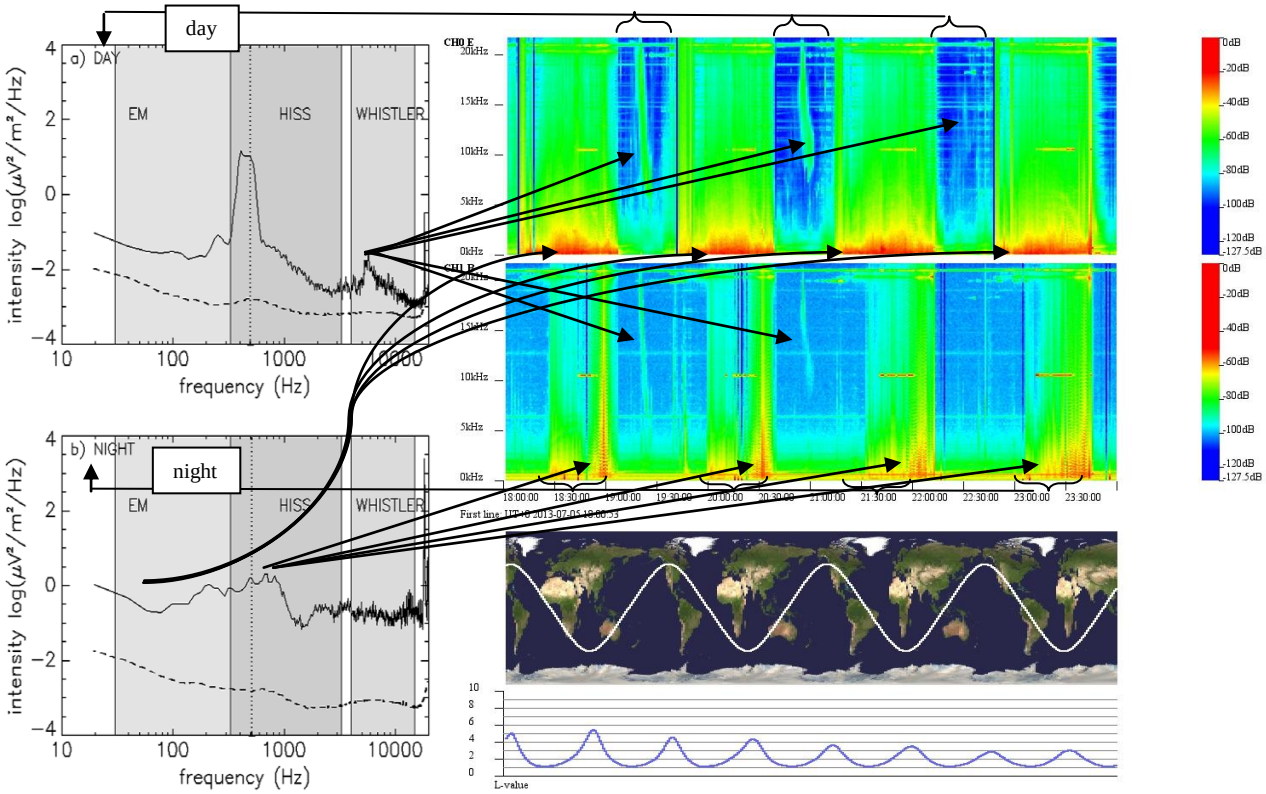


Рис. 1.

Типы излучений находятся в хорошей корреляции (левая часть Рис. 1) со статистическими данными спутника ***DEMETER*** [2].

Полученные в ходе анализа данных КЭ «Обстановка (1 этап) результаты обеспечивают хороший задел для запланированной на РС МКС Целевой работы (ЦР) «Обстановка (2 этап)».

1. С.И. Климов, В.А. Грушин, К. Балайти и др. Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперементе «*Обстановка (1 этап)*» на Российском сегменте МКС // Космическая техника и технологии № 1(15)/2021, с. …

2. Benck S., et al. Study of correlations between waves and particle fluxes measured on board the **DEMETER** satellite // Advances in Space Research 42 (2008) P. 1538–1549.

ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СПУТНИКОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ

Сурков В.В.[1,2,3], Мозгов К.С.[3]

[1]*ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия, surkovvadim@yandex.ru*
[2]*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия*
[3]*НПК «СПП», г. Москва, Россия*

Одним из важных факторов воздействия окружающей среды на космические аппараты (КА) являются потоки электронов и ионов высоких энергий, которые способны глубоко проникать в толщу материалов и внутренние части КА [1,2]. В результате такого воздействия КА приобретает электрические заряды, которые распределяются по поверхностям проводящих конструкций и в толще диэлектрических материалов. В работе [3] исследовался эффект электризации пассивных диэлектрических спутников под влиянием потока электронов радиационных поясов Земли (РПЗ) и рассчитывалось распределение электрического поля внутри спутников. Целью настоящей работы является обобщение результатов этой работы и развитие более совершенной модели явлений, учитывающей образование экранирующего плазменного слоя на поверхности спутника и возникновение радиационной проводимости в его объёме. Несмотря на оценочный характер проведённого исследования, результаты этой работы могут быть применены к низкоорбитальным наноспутникам сферической формы типа BLITS и BLITS-M.

В качестве модели рассматриваются диэлектрические наноспутники сферической конфигурации. Плотности потока электронов РПЗ и длины пробега электронов в веществе в зависимости от их энергии определяются эмпирическими формулами. Получено аналитическое решение, описывающее электрическое поле в диэлектрике в зависимости от расстояния до центра спутника. Расчёты, учитывающие эффект радиационной проводимости диэлектрика, показывают, что зависимость электрического поля от радиуса имеет немонотонный характер. Из анализа полученного решения следует, что такой вид зависимости поля обусловлен неоднородностью радиационной проводимости диэлектрика.

При увеличении плотности потока и энергии электронов РПЗ максимум электрического поля увеличивается, а его положение смещается от поверхности вглубь спутника. Для выбранных значений параметров и орбит высотой около 1500 км максимальное значение поля оценивается как $2.5-7$ кВ/см при максимальной энергии электронов 3 МэВ и $8-13$ кВ/см при максимальной энергии электронов 10 МэВ. Несмотря на то, что эти величины приблизительно на два порядка меньше порога электрического пробоя диэлектрика, можно ожидать локальных электрических разрядов вблизи неоднородных включений и неровностей на поверхности спутника. Вероятность микропробоев диэлектрика возрастает в периоды максимума солнечной активности.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, грант № 18-05-00108.

1. Кузнецов Н.В. / Модель космоса. Т. 1. Ред. М.И. Панасюк, Л.С. Новиков. 2007. С. **627**.
2. Lai S.T. / Fundamentals of spacecraft charging: spacecraft interactions with space plasmas. Princeton University Press, Princeton, NJ. 2011.
3. Сурков В.В., Мозгов К.С. // Космические исследования 2019. Т. **57.** С. 269

ВЛИЯНИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ПЕРЕДАТЧИКОВ В КВ-ДИАПАЗОНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОН ЗАСВЕТКИ ОДНОСКАЧКОВЫМИ ЛУЧЕВЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Мёрзлый А.М.[1,3], Сахаров Я.А.[2], Мингалев И.В.[2], Суворова З.В.[2], Талалаев А.Б.[4], Тихонов В.В.[5], Тихонов М.В.[5], Янаков А.Т. [1]

[1] *ФГБНУ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия*
[2] *ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, sakharov@pgia.ru;*
[3] *Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия*
[4] АО «*РТИ», г. Москва, Россия*
[5] АО «*РТИС ВКО», г. Тверь, Россия*

В докладе представлены результаты численного моделирования зон засветки лучевыми траекториями радиоволн КВ-диапазона для высоких широт. Проведен анализ влияния изменения места размещения передатчиков по широте в различных сезонных условиях.

ПРОЕКТ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ НА ЗЕМЛЕ ФРАНЦА-ИОСИФА: ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА ПРИБОРОВ И ТРЕБОВАНИЯ К ИХ РАЗМЕЩЕНИЮ

Козелов Б.В., Миличенко Е.А., Орлов К.Г., Балабин Ю.В., Федоренко Ю.В., Сахаров Я.А., Юрик Р.Ю., Гомонов А.Д., Мингалев И.В., Ролдугин А.В.

ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, г.Мурманск, Россия,

Расширенное освоение Арктики и Северного морского пути ставит новые задачи, связанные с его обеспечением, в том числе и гелиогеофизическом. Не очень частая наблюдательная сеть в Арктической зоне практически обрывается на берегу Ледовитого океана, т.е. в авроральной зоне. Далее на север расположена область магнитосферной полярной шапки, на которую влияние космической погоды в межпланетном пространстве сказывается напрямую. Регулярные научные наблюдения из этого магнитосферного домена практически ограничены арх. Шпицберген. Кратковременные экспедиционные наблюдения не дают достаточно полной картины и не могут быть основой для прикладных исследований. Поэтому расширение сети постоянно действующих гелиогеофизических обсерваторий является неизбежной необходимостью. В докладе представлены научные обоснования создания такой обсерватории на Земле Франца-Иосифа, возможный состав приборов и требования к их размещению. За основу взят опыт Полярного геофизического института по проведению работ в обсерватории Баренцбург на арх.Шпицбергене.

ВЛИЯНИЕ ВЫСЫПАНИЙ ЧАСТИЦ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ЗОНЫ ДОСТУПНОСТИ ОДНОСКАЧКОВОЙ КВ РАДИОСВЯЗИ МЕЖДУ РАЙОНАМИ НА ВЫСОКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТАХ

Сахаров Я.А.[1], Козелов Б.В.[1], Мёрзлый А.М.[2,3], Мингалев И.В.[1], Суворова З.В.[1], Черняков С.М.[1], Талалаев А.Б.[4], Тихонов В.В.[5], Тихонов М.В.[5], Янаков А.Т. [2]

[1] *ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия,* sakharov@pgia.ru;
[2] *ФГБНУ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия*
[3] *Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия*
[4] АО «*РТИ», г. Москва, Россия*
[5] АО «*РТИС ВКО», г. Тверь, Россия*

В докладе представлены результаты численного моделирования областей на поверхности Земли в районе Баренцева моря, в которые попадают односкачковые лучевые траектории радиоволн КВ-диапазона, выходящие из расположенного на средних широтах передатчика. Моделирование проведено для условий суббури 24.12.2014 г. и для более спокойных условий 27.12.2014 г. в одно и тоже время суток. Параметры ионосферы задаются по эмпирическим моделям с поправкой, построенной по данным о полярных сияниях и полному электронному содержанию, определенному по данным спутников, пролетевших над областью наблюдения этих сияний. Анализируются изменения возможностей односкачковой КВ радиосвязи между районом Баренцева моря и районами, расположенными на средних широтах, во время авроральных высыпаний и во время спокойных условий.

ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ГЕЛИОГЕОФИЗИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

***Мирмович Э.Г.**, к.ф.-м.н., доцент; **Авдотьин В.П.**, к.т.н., доцент*

РУДН, г. Москва, mirmovich1940@mail.ru

Необходимым условием реализации любой чрезвычайной ситуации (ЧС) является наличие людей или/и объекта экономики в зоне воздействия её потенциального источника.

В системе обеспечения безопасности многокомпонентные угрозы из космоса являются одним из самых опасных потенциальных источников ЧС синергетического характера. Наряду с реальной астероидно-кометной опасностью (АКО), подчиняющейся подобно крупным землетрясениям распределению с т. н. «тяжёлыми хвостами», в ряду негативных воздействий на жизнедеятельность людей и объекты экономики комплекс гелиогеофизических возмущений занимает своё место. Учёными и специалистами МЧС России ещё в 1993 году были выработаны критерии неблагоприятных и опасных гелиогеофизических явлений, могущих привести к ЧС, и введены в систему предупреждения органов государственной власти, Вооруженных Сил РФ и населения об опасных природных явлениях, в целях предотвращения гибели людей на земле и в космическим пространстве при орбитальных полётах, снижения экономического ущерба.

1.В качестве параметра для классификации радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве (ОКП) принимается величина **I** – плотность потока заряженных частиц в $см^2с^{-1}$, проникающих за алюминиевую защиту толщиной 1 г $см^{-2}$ (протоны с энергией E > 30 МэВ, электроны с энергией E > 2 МэВ) по измерениям в полярных шапках магнитосферы Земли или вне магнитосферы.

1.1.Резкое ухудшение радиационной обстановки в ОКП классифицируется как неблагоприятное явление при условии, что плотность потока протонов I солнечных космических лучей (СКЛ) находится в пределах $5\ 10^3$ $см^2с^{-1} \div 5\ 10^4$ $см^2с^{-1}$ (при постоянных значениях $I = 5\ 10^3$ $см^2с^{-1}$ в полярных шапках доза излучения, обусловленная СКЛ, на орбите высотой 300 – 500 км при угле наклона 52° за защитой 1 г $см^{-2}$ составит 1 ÷ 25 рад в сутки в зависимости от степени возмущенности магнитосферы).

1.2.Резкое ухудшение радиационной обстановки классифицируется как опасное явление при условии $I > 5\ 10^4$ $см^{-2}с^{-1}$.

2.К изменениям ионосферы, способным привести к резким нарушениям условий распространения радиоволн, отнесены:

2.1.Появление и сохранение в течение ≥ 3 ч подряд отрицательных отклонений от медианных значений критических частот слоя F_2 (δf_oF_2) > 50 %;

2.2.Появление поглощения в полярной шапке (явление РСА) по риометрическим данным > 3 дБ в течение ≥ 3 ч. При отсутствии оперативных риометрических данных считать эквивалентным указанному критерию:

- появление (по измерениям на ИСЗ "Метеор") потоков протонов (E > 15 МэВ) в высоких широтах при **I** > 10^3 $см^{-2}с^{-1}$;
- появление полного замирания сигналов в КВ-диапазоне по наблюдениям методом измерения поглощения на наклонных трассах в течение 20 мин. и более.

Актуальность работы. Ряд исследователей космоса этого нормативного акта не знают. Кроме того, нужна корректировка данных критериев, что связано с успехами в экспериментальном изучении ОКП как в ионосферно-магнитной, так и в радиационной составляющей. Нет влияния магнитных бурь на ряд объектов экономики, учёта засорения ОКП мусором, риск от которого выше АКО. В свете измерений нейтронов с E > 20 МэВ на ИСЗ "SMM", ИСЗ "КОРОНАС-Ф", на аэростатах и в других экспериментах, возможно, предстоит пересмотреть вопрос о составе СКЛ, что важно для полётов на длинных авиатрассах. Такие поправки будут иметь биолого-социальное и экономическое значение. Важно и то, что пересмотр состава СКЛ может изменить наши взгляды и на количественное наличие нейтронов на Солнце, хотя механизм их выброса в КП не ясен.

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ АНСАМБЛЯ РЕШАЮЩИХ ДЕРЕВЬЕВ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

Ожередов В.А., Бреус Т.К., Сасонко М.Л.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.com

У авторов работы имелась база данных по 24-часовому мониторированию электрокардиограмм здоровых добровольцев и больных артериальной гипертензией на протяжении 4 месяцев в течение 2016 -2017 года. Анализ проводится с целью исследования влияния локальных атмосферных условий и космической погоды на показатели сердечного ритма этих людей. В качестве предикторов выбирались 6 основных характеристик локальной погоды и значения горизонтальной составляющей магнитного поля. Использовался метод построения дерева решений. Мы применили наш метод для выявления многофакторного влияния окружающей среды (включая магнитное поле) на длину кардиоинтервалов человека с целью получения компактных закономерностей, связывающих сильное возрастание или уменьшение длины кардиоинтервала с определенной динамикой параметров внешней среды.

Как известно [1], построение оптимального даже в плане одного критерия дерева является NP-полной задачей, т.е. сводится к полному перебору. Полуэмпирические методы (типа минимума энтропии) в большинстве случаев дают вполне приемлемые результаты, но лишь в случае одного, раз и на всегда заданного критерия – а именно, взвешенной суммы вероятностей ошибочных решений дерева. В настоящей работе представлен алгоритм генерации не одного-единственного дерева, а целого ансамбля отличающихся структурой, глубиной и составом вершин деревьев, оптимальных с точки зрения 3-х критериев: взвешенной суммы вероятностей ошибочных решений, вероятности отказа от принятия решений и еще одного параметра, отвечающего одновременно за простоту интерпретации деревьев специалистами в предметной области, с данными которой работает дерево, и устойчивость решений по отношению к случайным возмущениям обучающей выборки. В рассматриваемом в работе методе многокритериальной эволюционной оптимизации разработаны и программно реализованы новые подходы к кодированию, модификации, гибридизации деревьев, а также уникальный метод эволюционного отбора (т.н. «туннельная конкуренция»), позволяющий избежать «застревания» оптимизационной процедуры в локальных минимумах.

Сравнение рассматриваемого многокритериального эволюционного алгоритма с пакетами построения решающих деревьев на языке Python [2] на стандартных тестовых выборках [3] продемонстрировало гораздо большую устойчивость и компактность деревьев, полученных нашим способом.

1. https://en.wikipedia.org/wiki/Decision_tree_learning
2. https://scikit-learn.org/stable/modules/tree.html
3. http://networkrepository.com/mushroom-agaricus-lepiota.php

ПЕРЕГРУЗКА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТЬЮ ПРИ НАСЫЩЕНИИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ БЛОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ГЕОИНДУЦИРОВАННЫМИ ТОКАМИ

Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н.

ТГУ, г. Тольятти, Россия, VVVahnina@yandex.ru

Воздействие геоиндуцированных токов (ГИТ), интенсивность которых зависит от вида блока «синхронный генератор – трансформатор», количества блоков в составе электростанции и количества отходящих линий электропередачи, вызывает одностороннее насыщение магнитной системы блочного трансформатора. В блочных трансформаторах (БТ) с номинальной мощностью более (80…100) МВА используют бронестержневую или броневую конструкции магнитной системы при трехфазном и однофазном исполнении соответственно. В таких трансформаторах для смещения режима перемагничивания магнитной системы в область технического насыщения достаточно ГИТ, соизмеримого с паспортным значением тока холостого хода. Насыщение магнитной системы БТ под воздействием ГИТ способно вызвать существенное изменение условий функционирования синхронного генератора. При глубоком насыщении магнитной системы ток намагничивания БТ приобретает практически униполярную форму и содержит полный спектр высших гармоник (2-й, 3-й, 4-й, 5-й, 6-й и т.д.) на фоне многократного увеличения тока основной гармоники.

Увеличение мощности намагничивания БТ при неизменной механической мощности на турбине и соответственно генерации активной мощности сопровождается увеличением тока статора синхронного генератора за счет возрастания реактивной составляющей тока. Возникает симметричная перегрузка по току статора, если исходный режим работы синхронного генератора близок к номинальному. Кратность перегрузки по току статора более 1,5 для синхронных генераторов не допускается даже кратковременно [1]. Поэтому для синхронных генераторов предусматривается защита от симметричной перегрузки, которая действует на сигнал с выдержкой времени (6…9) с, а ток срабатывания выбирается на (30…40)% больше номинального тока статора. Таким образом, в результате воздействия ГИТ на блок «синхронный генератор – трансформатор» возможно срабатывание защиты от симметричной перегрузки, если исходный режим по активной мощности близок к номинальному. Максимальная перегрузка турбогенераторов и гидрогенераторов активной мощностью ограничивается мощностью, которую могут развивать первичные двигатели (паровые турбины и гидротурбины соответственно), оказывается крайне незначительной при воздействии ГИТ на блок «синхронный генератор - трансформатор». Это объясняется тем, что ГИТ практически не оказывают влияния на режим работы первичных двигателей.

Перегрузка турбогенераторов и гидрогенераторов реактивной мощностью, вызванная необходимостью компенсации возрастающей под действием ГИТ мощности намагничивания блочного трансформатора путем форсирования возбуждения вплоть до потолочного, может оказываться весьма значительной. При сохранении неизменного уровня активной мощности увеличение реактивной мощности генератора вызовет перегрузку полной мощностью, которая будет сопровождаться перегрузкой по току статора кратностью до 2,0 …2,5 за счет реактивной составляющей тока. Одновременно будет перегружаться и обмотка возбуждения вследствие форсирования возбуждения.

1. ГОСТ 533-2000 (МЭК 34-3-88). Машины электрические вращающиеся. Турбогенераторы. Общие технические условия.

Шевелева Д.А., Апатенков С.В., Сахаров Я.А., Гордеев Е.И.
Работа проведена в рамках проекта РНФ 19-77-10016

Авроральные структуры, связанные с геомагнитно индуцированными токами

В работе были определены авроральные структуры, связанные с большими геомагнитно индуцированными токами (ГИТ). В записях ГИТ на станции Выходной (Кольский полуостров, 65MLat) были отобраны 140 самых возмущенных часовых интервалов за 2012-2018 годы. Для поднабора из 97 событий были доступны наблюдения полярных сияний в УФ диапазоне над станцией Выходной, регистрируемые низковысотными спутниками DMSP/SSUSI. В результате для 27 событий (28%) был зафиксирован развивающийся авроральный балдж над станцией Выходной, что соответствует взрывной фазе магнитосферной суббури. Для 31 события (32%) были обнаружены авроральные омега структуры в пределах одного часа MLT от наблюдений ГИТ. В утреннем секторе 01-07 MLT более 80% ГИТ событий были связаны с омега структурами. Таким образом, удалось предварительно классифицировать ионосферные токовые системы, вызывающие существенную часть экстремальных ГИТ событий.

3х-ЧАСОВЫЕ ИНДЕКСЫ ИОНОСФЕРНОЙ АКТИВНОСТИ

Гуляева Т.Л.(1), Хараламбус Х.(2)

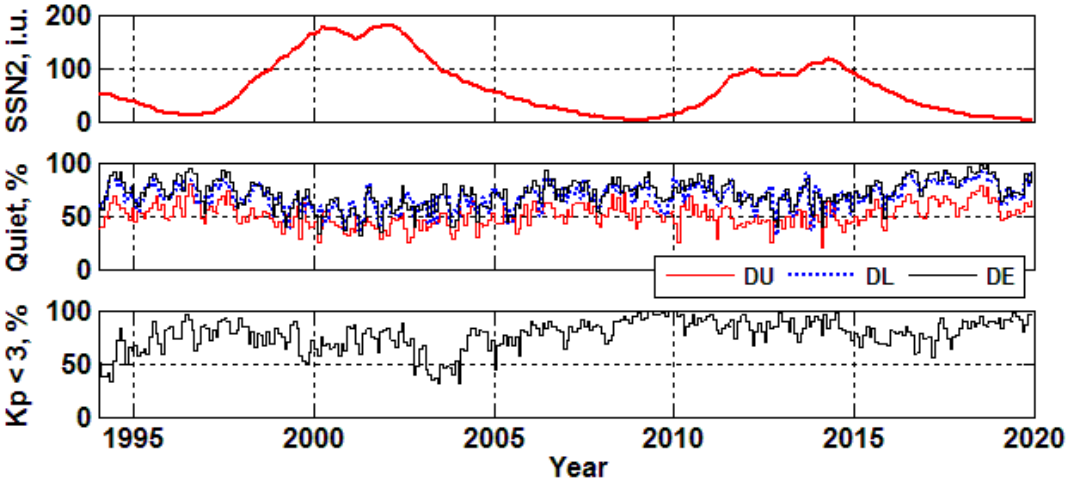
[1]*ИЗМИ РАН, г. Москва, Россия, gulyaeva@izmiran.ru*

[2]*Frederick Research Center, Nicosia, Cyprus*

В отличие от 1-часовых индексов, 3хчасовые индексы ионосферной активности позволяют отметить устойчивые изменения в ионосфере, длительностью в 3ч и более. В работе предложена система глобальных 3х-часовых индексов ионосферной активности, представляющих собой средневзвешенное значение положительного ионосферного возмущения DU, отрицательного ионосферного возмущения DL и диапазон возмущения DE = DU - DL, обозначенных подобно индексам авроральной электро-струи AU, AL и AE. По данным глобальных карт полного электронного содержания GIM-TEC за 1994-2020 гг показано, что ионосферная активность синхронизирована с солнечной активностью.

Проведено сравнение с 3х-часовыми индексами геомагнитной активности kp, ap, и aa. На Рис. 1 показано, что ионосфера находится в спокойном состоянии (ниже уровня введенных пороговых значений ионосферной возмущенности) в 50 - 70% времени положительных возмущений DU и от 50 до 90% времени отрицательных DL и диапазонных возмущений DE. При этом магнитосфера находится более длительное время в спокойном состоянии (индекс kp < 3), чем ионосфера. Долговременные изменения геомагнитной активности показывают корреляцию с мощностью солнечных циклов с максимумами вероятности геомагнитных возмущений в 19м и 21м циклах солнечной активности и убыванием активности с 21го солнечного цикла по настоящее время.

Ретроспективное исследование локальной ионосферной возмущенности DU, DL и DE по станциям Москва, Слау и Канберра с 1945г по 2020г показало зависимость результатов от неполноты рядов наблюдаемых данных критической частоты слоя F2. Предложена реконструкция отсутствующих данных в рядах ионосферных измерений по методу подобия, что позволило получить долговременное распределение положительных, отрицательных и диапазонных 3х часовых ионосферных индексов DU, DL и DE в течение семи циклов солнечной активности. Реконструированная база ионосферных данных доступна по адресу https://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/grif/peak/.



Работа выполнена при поддержке совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-52-250001_Кипр_а, и Национального исследовательского фонда Кипра RPF Bilateral/Russia(RFBR)1118/0004 «Ретроспективное моделирование и прогноз ионосферной погоды» (RENAM).

НАЛОЖЕНИЕ АВРОРАЛЬНЫХ ТОКОВ В ОБЛАСТИ РАЗРЫВА ХАРАНГА

А.Н.Зайцев, К.Х.Канониди, В.Г.Петров

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, г. Москва, Троицк, alex.zaitsev1940@mail.ru .

В середине прошлого века Лейв Харанг [1] провел детальные исследования характера полярных геомагнитных возмущений на цепочке магнитометров вдоль меридиана Шпицберген - Тромсе. Было показано, что основной признак полярных возмущений - наличие сильных струйных токов в противоположных направлениях в зоне полярных сияний. Положительные бухты представляют собой струйные токи текущее на восток, отрицательные бухты представляют собой токи текущие на запад. При этом токи сближаются в вечерние часы так, что между ними образуется зазор. В дальнейших исследованиях этот зазор получил имя – «разрыв Харанга».

После периода МГГ (1957 – 1958) и с началом космической эры исследования характера полярных магнитных возмущений послужили основой создания токовой системы включающей как один из факторов «разрыв Харанга» [2]. В дополнение к наземным геомагнитным наблюдениям исследования токовых систем были выполнены с помощью спутников, ракетных пусков, радаров которые позволили построить детальную картину токов в системе «солнечный ветер - магнитосфера – ионосфера». При ‘том характер токов в области взаимодействия элекроструй остается без детального описания так как прямые измерения токов на высотах стоя Е ионосферы остаются труднодоступными [3], а большая изменчивость системы токов снижает достоверность статистических обобщений.

Создание плотных цепочек магнитометров вдоль меридианов в зоне полярных сияний [5], позволяет детально исследовать характер взаимодействия токов в области разрываХаранга. Оказалось, что в большинстве случаев зазор между токами представляет собой плавный переход в пространственном распределении полей и токов. В тоже время в отдельных случаях хорошо видно. что происходит близкое сближение токов разного направления – см. пример по данным магнитометров на Ямале для случая суббури 27 апреля 2018 года [4]. По базе данных магнитометров на Ямале была проведена выборка случаев суббурь которые имели характер знакопеременных бухт. Построение годографов и ручная выборка уровня отсчетов подтвердили наличие наложения элекроструй разного направления. Оценка характера возмущений магнитометров с данными спутниковой системы АМПЕР и с данными радара СуперДАРН накрывающего Ямал показали наличие вихревых образований токов. Дальнейшее исследование большего числа случаев в сопоставлении с дополнительными данными позволит представить детальную картину токов в области разрыва Харанга.

Работа выполнена в ИЗМИРАН в рамках Государственного задания № 01201356397.

1. Harang L. The mean field of disturbance of polar geomagnetic storms // Terr. Magn. Atmos. Electr., V. **51**(3), P. 353– 380, doi:10.1029/TE051i003p00353
2. Kamide Y., Akasofu S.-I., Zaitzev A.N. et.al. // J.Geophys.Res. 1982. V. **87**, P. 8228.
3. Heppner, J. P. // Geophys. Norv. 1972. V.**29**, P. 105.
4. Зайцев А.Н., Канониди К.Х., Петров В.Г., Перспективы развития геофизического полигона на Ямале, http://pgia.ru/lang/ru/conf/gelio/gelio_in_arctic2018, С. 43
5. Зайцев А.Н., Петров В.Г., Гамза Е.И., Петрукович А.А. Реновация проекта «Геомагнитный меридиан 145» //https://plasma2019.cosmos.ru/docs/plasma2019-abstract-book_1102.pdf, С. 178

ГЛОБАЛЬНАЯ МЕДИАННАЯ МОДЕЛЬ TEC ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ ПРИЕМНИКОВ

Шубин В.Н., Гуляева Т.Л.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, shubin@izmiran.ru

В последние годы развиваются эмпирические модели полного электронного содержания (TEC), основанные на данных глобальных ионосферных карт (GIM), которые предоставляются Международной службой GNSS (Global Navigation Satellite Systems). Нами создана глобальная эмпирическая модель TEC, основанная на данных GIMs. Модель построена на пространственной сетке из 5112 ячеек, размером 5° по долготе и 2.5° широте по данным TEC наземных приемников, полученных за период 1994–2019 гг. Входными параметрами модели являются день, месяц, год, мировое время и географические координаты. В качестве индексов солнечной активности могут использоваться новые числа солнечных пятен, усредненные за 12 месяцев – SSN2 для климатической модели с долгосрочным прогнозированием (месяцы, годы). Для краткосрочного прогнозирования TEC (один или несколько дней) в модели применяется интегральный индекс солнечной активности – $FF_{10.7}(day, \tau)$, который является накоплением временного ряда значений $F_{10.7}$ с экспоненциальным сглаживанием. Здесь day – текущий день, τ=0.96, что соответствует характерному времени ≈27 дней (один оборот Солнца) до текущего дня.

Работа выполнена при поддержке совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-52-250001_Кипр_а, и Национального исследовательского фонда Кипра RPF Bilateral/Russia(RFBR)1118/0004 (RENAM).

ГЕОМАГНИТНЫЕ СУББУРЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ ВО ВРЕМЯ БУРИ 11-12 АПРЕЛЯ 2001

Дэспирак И.В.[1], Гинева В.[2], Любчич А.А.[1], Лосев А.В.[1], Сецко П.В.[1], Вернер Р.[2]

[1] *Полярный геофизический институт (ПГИ) г. Апатиты, Мурманская область, Россия,* despirak@gmail.com

[2] *Институт Космических Исследований и Технологий (ИКИТ), БАН, г. Стара Загора, Болгария*

Цель данной работы - выявить возможные среднеширотные магнитные эффекты интенсивных суббурь. Была выбрана интенсивная магнитная буря 11-12 апреля 2001 (Dst ~ -300 нТл), во время которой наблюдалось 3 интенсивные суббури. Интенсивность суббури определялась по индексам геомагнитной активности SML и AL. Работа проводилась по данным глобальных сетей магнитометров SuperMAG, INTERMAGNET и IMAGE, среднеширотные положительные бухты наблюдались одновременно с отрицательными бухтами на авроральных широтах. Очень интенсивные суббури, с большими отрицательными значениями индекса SML (≤ -2000 нТл), в последнее время получили название «суперсуббури» (supersubstorms - SSS). Во время этой бури было зарегистрировано два события SSS 11 апреля 2001 г. (16:09 UT и 20:24 UT). Мы обнаружили, что первая суперсуббуря сопровождалась значительными магнитными бухтами на средних широтах. Кроме того, конвертирующая широта смены знака магнитной бухты в этом событии была расположена на геомагнитных широтах, которые были на ~ 10 градусов ниже, а амплитуды магнитных бухт на средних широтах были примерно в 2 раза больше, чем их типичные значения во время обычных суббурь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Национального научного фонда Болгарии, проект № 20-55-180003.

АКТИВНЫЕ ОБЛАСТИ – ИСТОЧНИКИ СПС В 24 СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия, ishkov@izmiran.ru

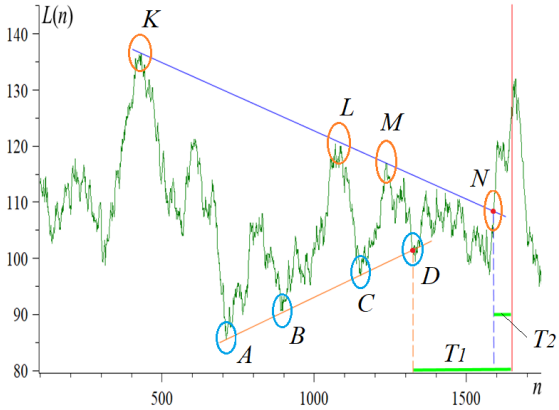
Проведено исследование активных областей (АО), в которых осуществилась серия протонных вспышек как на видимом диске Солнца, так и залимбовых. Из всей совокупности источников солнечных космических лучей (СКЛ) в таких АО, по готовящемуся к публикации Каталогу за 24 цикл солнечной активности были выбраны уверенно отождествлённые солнечные протонные вспышечные события, и рассмотрены характеристики самих АО с целью выявления возможных условий осуществления серий протонных вспышечных событий и отличий вспышечного события без выхода солнечных протонов от такого же, но с протонами. Более ранние работы показали, что солнечные вспышечные события есть следствие взаимодействия новых всплывающих магнитных потоков с определёнными параметрами (выше пороговых для значимых вспышечных событий) с уже существующим магнитным полем АО (или вне её). Они всегда осуществляются сериями и для появления новой серии вспышек нужно появление нового магнитного потока. Роль АО заключается, в создании условий (по видимому в локальном участке конвективной зоны) последовательных всплытий новых магнитных потоков. Для "протонных" АО определяющую роль играет общая магнитная конфигурация, допускающая или запрещающая выход частиц из области влияния её магнитного поля. Хорошим примером АО, полностью закрывшей возможность выхода СКЛ, и даже корональных выбросов вещества, стала самая большая по площади группа пятен октября 2014 г., в которой реализовалось 6 вспышек балла X и 36 – балла M. Её "глобальная" магнитная конфигурация представляла собой простой диполь с полюсами в месте локализации ведущих и ведомых пятен, и надёжно защищало области вне данной АО от динамических процессов внутри её. В докладе разбираются возможности АО со вспышечными событиями, генерирующими СКЛ, сохранять эту способность длительное время прохождения по видимому диску Солнца и за его пределами.

ОБНАРУЖЕНИЕ КРАТКОСРОЧНЫХ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИ АНАЛИЗЕ СТАТИСТИКИ ВАРИАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

[1]Коган Л.П., [2]Канониди К.Х., [3]Надежка Л.И., [4]Вольвач А.Е, [1]Кислицын Д.И.

[1]ННГАСУ, г. Нижний Новгород, Россия, L_kog@list.ru , [2]ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, [3]ВГУ, г. ВОРОНЕЖ, Россия, [4]КрАО РАН, Республика Крым, Россия

В работе рассматриваются свойства магнитного поля, связанные с изменением уровня хаоса статистики его измеряемых значений при возможном влиянии процессов подготовки надвигающихся землетрясений. Далее использовались данные измерений Н-компоненты этого поля, полученные в августе 2019 г. на Крымской астрономической обсерватории (КрАО) и в марте 2020 г. на геофизической обсерватории «Галичья гора» Воронежского государственного университета. При расчетах был применен статистический функционал $L(n) = \frac{\mathcal{A}}{M}\sum_{l=n-M+1}^{n}|L_l|$, $L_l = \sum_{m=0}^{N-1}(-1)^m P_{l,m}$ [1, 2]. Здесь $M = 100$ и $\mathcal{A} = 1000$. Коэффициент $P_{l,m}$ есть вероятность попадания значений случайной величины (СВ) $\sin(x)$, где x – измеренные значения поля в нТл, в интервал вида $[-1 + mh, -1 + (m+1)h)$ (здесь $0 \le m \le N-1$, $h = 0.1$ и $N = 20$) разбиения области значений данной СВ. Индекс l – номер отрезка реализации протяженностью 60 секунд, включающего 60 измерений. Зависимость $L(n)$ сопоставлялась с моментами землетрясений магнитудой 4+, произошедших в регионе от Румынии до запада Ирана в указанные периоды времени.



На рисунке приведена зависимость $L(n)$, построенная по данным КрАО за 9 и часть 10 августа 2019 года (зеленая кривая). По оси абсцисс отложено время в минутах, считая с 00:00 9 августа. Оранжевая прямая AC проведена через точки A и C (как и точки B и D, соответствующие области рисунка выделены синими эллипсами). Эта прямая проходит мимо точки B на удалении по вертикали не более чем на 0.5% от значения функционала $L(n)$ в данной точке. От времени четвертого тестирования данной прямой кривой $L(n)$, в точке D, выделенной красной отметкой (точка B также рассматривается как случай такого тестирования), отсчитывается интервал $T_1 = 315$ мин. до момента землетрясения магнитудой 4.9 (он отмечен вертикальной прямой красной линией), произошедшего 10.08.2019 в 07:35:10.28 UTC на глубине 10 км в точке эпицентра 41.6599 СШ и 46.6057 ВД (север Азербайджана). Подобно AC, синяя прямая KM проведена через точки K и M, проходит мимо точки L на расстоянии по вертикали не более 1.2% от значения функционала $L(n)$ в этой точке и четвертый раз тестирует кривую $L(n)$ в выделенной красной отметкой точке N. Смысл интервала $T_2 = 60$ мин. тот же, что и для T_1.

Прямые линии, подобные приведенным на рисунке, с большой вероятностью предшествуют землетрясениям в указанном регионе в отмеченные периоды 2019 и 2020 гг. (В ряде случаев они становятся почти строго параллельными, образуя «каналы»; при этом величины промежутков вида $T_{1,2}$ отсчитываются от точки пятого тестирования границами таких каналов кривой $L(n)$.) Величина интервалов вида $T_{1,2}$ в большинстве случаев не превосходит нескольких часов. Из статистического смысла функционала $L(n)$ следует, что существование указанных прямых свидетельствует о возникновении (по мере приближения землетрясений) линейных по времени границ для уровня хаоса в измеряемых процессах.

[1] Коган Л. П. // Геомагнетизм и аэрономия 2015. Т. **55**(4). С. 525.
[2] Коган Л.П., Кислицын Д.И., Красникова О.В., Медяник И.А., Гордецов А.С. // Современные технологии в медицине 2017. Т. **9**(4). С. 25.

ФОНОВЫЕ УСЛОВИЯ И ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СВЕТОВЫХ ФАКТОРОВ НА ИЗОБРАЖЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ АВРОРАЛЬНЫХ ЭМИССИЙ, ПОЛУЧАЕМЫЕ С ОРБИТ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Кузьмин А.К.

ИКИ РАН, alkkuzmin@mail.ru

Доклад представлен как одна из частей методико-аналитического задела при подготовке экспериментов с авроральными имаджерами на перспективных космических аппаратах. Получение изображений авроральных эмиссий в видимой и ВУФ- областях спектра, излучаемых в толще атмосферы и ионосферы, с разных орбит связано с выделением их над фоном с помощью полосовых фильтров в изображающих камерах или с помощью монохроматоров и выходных щелей в спектрографических имаджерах. При селекции авроральных эмиссий часть фоновых квантов проходит сквозь полосу пропускания приборов и попадает на изображающий детектор. Рассматриваются характеристики источников фона в видимом и ВУФ- спектральных диапазонах и их влияние на изображения эмиссий в авроральных структурах.

Кузьмин А.К.[1], Мерзлый А.М.[1], Никифоров О.В.[1], Петрукович А.А.[1], Моисеев П.П.[2], Позин А.А.[3], Щукин Ю.А.[3], Баньщикова М.А.[4], Авдющев В.А.[4]

1- Институт космических исследований РАН, 2- НПП АстронЭлектроника, 3 – НПО Тайфун, 4 – Томский Государственный Университет

ДИСТАНЦИОННАЯ ГЛОБАЛЬНАЯ И ЛОКАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА МГНОВЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ С ОРБИТ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КА И ЗОНДИРУЮЩИХ РАКЕТ ОПТИЧЕСКИМ И ПРЯМЫМИ МЕТОДАМИ В ИНТЕРЕСАХ РЕШЕНИЯ НАУЧНЫХ И ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ

Представляется концепция диагностики характеристик полярной ионосферы с орбит КА и зондирующих ракет, нацеленная на исследования процессов в полярной ионосфере. Рассматривается методика одновременных глобальных крупномасштабных и локальных мелкомасштабных измерений интенсивности конкретных авроральных эмиссий с орбиты типа Молния и с орбиты типа Метеор и координированных высотных распределений характеристик плазмы в вечерне-полуночном секторе MLT аврорального овала с миниатюрных платформ зондирующей ракеты в Тикси.

GROUND BASED SOLAR SERVICE USING SPOT, STOP AND RATAN-600

Naga Varun Y., Tlatov A.G., Storozhenko A.A

SAO RAS, Nizhny Arkhyz, Russia, naga.varuny@gmail.com

Solar service implies monitoring the Sun regularly or continuously in different wavelengths of the electromagnetic spectrum. The main purpose of such a service is to understand fundamental physical processes undergoing on the Sun and determine the parameters of coronal mass ejections (CMEs), flares, solar wind and etc., for practical applications by using data obtained by terrestrial or satellite telescopes.

Given the proximity of the Sun, the effects of solar flares and CMEs cannot be exaggerated on the Earth's magnetosphere. Therefore, the need for solar service to help forecast such energetic phenomena is further augmented due to the rapid progress in satellite communications' technology, human space exploration like ISS (International space station), air travel and etc. Such a forecast can be made from ground based continuous solar monitoring in the well know wavelengths of CaII-K and H-α, which form in the mid and upper chromospheres respectively. CaII-K line is especially important because of its strong correlation with the hard X-ray flux during solar flares.

Keeping in view the need for the solar service and the high cost of the space borne telescopes, special ground-based telescopes such as SPOT (Solar patrol optical telescope) and STOP (Solar telescope for operational prognoses) are developed. Apart from being several times cheaper than their space counterparts they can easily be upgraded with new equipment and capabilities keeping in line with the modern developments in the instrumentation technology.

The scientific task of the SPOT is to observe various manifestations of solar activity, such as, plages, filaments, prominences, flares, CMEs, and etc. SPOT continuously registers images of the full solar disc in CaII-K 3934 A˚, H-α 6563 A˚ spectral lines. The most important feature of this telescope is that it can scan the Sun completely in a given wavelength interval and therefore makes it possible to extract dopplergrams from the spectral data. In this way one can estimate the kinematic parameters of the eruption events like CMEs.

As most of the phenomena on the Sun take place due to intense magnetic activity, it is quite essential to have a continuous survey of the magnetic state of the Sun. This is done by STOP, which is essentially a magnetograph capable of measuring large scale magnetic fields on the photosphere along the line of sight with a resolution of 30 arcsec. Large scale magnetic fields are formed due to the imbalance in concentrated flux and more diffuse flux and are important because of their connection with the interplanetary magnetic field. Also, the space weather parameters near the Earth can be predicted by using the data of STOP with the help of Wang–Sheeley–Arge (WSA) semiempirical model.

We also note the importance of the solar spectral polarization complex (SSPC) at RATAN-600, which is unique because of its ability to monitor the solar corona in a range of radio frequencies from 3 GHz to 17 GHz. Such spectral and polarization measurements with great resolution makes RATAN-600 a vital instrument for frequency tomography of the corona.

At present SPOT continuously monitors the Sun in CaII-K and H-α spectral lines from Kislovodsk since 2011. Similarly STOP has been initiated at three different places namely Kislovodsk, Irkutsk and Ussuriysk. In the very near future SSPC of RATAN-600, will be modernized to a new level, where individual active regions can be continuously monitored. Therefore, SSPC supplements the data provided by the SPOT and STOP network for a better solar monitoring service.

The work was accomplished due to the government contract of the SAO RAS approved by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

1. Naga Varun Y., Tlatov A. G. // DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2 2020 395
2. Storozhenko A.A., Bogod V. M. et al // DOI:10.26119/978-5-6045062-0-2 2020 405

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ ЗАВИСИМОСТИ ГАРМОНИК ТОКА ЧЕРЕЗ ТРАНСФОРМАТОР ОТ ВЕЛИЧИНЫ ГИТ

Селиванов В.Н., Сахаров Я.А.

ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия, v.selivanov@ksc.ru

В ходе экспериментальных исследований влияния геоиндуктированных токов (ГИТ) на насыщение магнитопровода трансформатора [1] выявлено неоднозначное поведение высших гармоник: возможны как рост, так и снижение амплитуды тока гармоники с ростом величины ГИТ. По отношению к характерным временам процессов в электрической сети ГИТ можно считать постоянным током. Исследованию влияния величины постоянного тока подмагничивания на гармонический состав тока в обмотках трансформаторов посвящен ряд публикаций [2, 3], в которых указывалось на немонотонный характер зависимостей, однако причины этого явления не были однозначно определены.

Нами получено аналитическое решение для гармоник тока через нелинейную индуктивность при подмагничивании ее постоянным током. С помощью простейшей математической модели процесса подмагничивания нелинейной индуктивности постоянным током показано, что немонотонный ход функциональной зависимости гармоник тока от величины ГИТ в нейтрали силового автотрансформатора определяется исключительно нелинейной вебер-амперной характеристикой его магнитной системы. Все высшие гармоники демонстрируют одинаковый ход зависимостей:

- зависимости начинаются от нулевого значения, так как при отсутствии подмагничивания ток в цепи тоже отсутствует;
- зависимости носят немонотонный характер, имея несколько максимумов, число которых на единицу меньше номера соответствующей гармоники;
- возможна ситуация, когда в определенном диапазоне изменения величины постоянного тока третья и шестая гармоники растут, а девятая уменьшается, что соответствует результатам, полученным в эксперименте.

Результаты имеют качественный характер, но позволяют исследовать процесс насыщения магнитопроводов силовых трансформаторов при подмагничивании постоянным током и выяснить, какое возможное вторичное влияние способны оказать ГИТ на автоматику и релейную защиту силовых трансформаторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы приграничного сотрудничества Коларктик 2014-2020 (проект KO2011 ARINKA - Инфраструктура арктических железных дорог в регионе Коларктик).

1. Селиванов В.Н., Баранник М.Б., Билин В.А. и др. // Труды КНЦ РАН. 2017. №1. С. 43.
2. Walling R. A., Khan, A. N. // IEEE Trans. on Pow. Del. 1991. V. 6. № 4. P. 1707.
3. Lu S., Liu Y,. De La Ree J. // IEEE Trans. on Pow. Del. 1993.V. 8. №. 2. P. 725.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ В МЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛЯ ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Шамсутдинова Ю.Н, Кашапова Л.К

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, yulia@mail.iszf.irk.ru

Представляем первые результаты разработки информационной системы визуализации динамических спектров в метровом радиодиапазоне, который может быть использован как для исследования явлений в солнечной атмосфере, так и для анализа событий космической погоды.

Разрабатываемая система должна будет иметь возможность изображать интенсивность и поляризацию на выбранном участке времени в широком диапазоне частот (от 1 ГГЦ до 0.1 МГц), а также сопоставлять ее другими видами наблюдений. В ходе работы используются наблюдательные данные инструментов AMATERAS, ORFEES, Waves/ Stereo. В качестве наблюдений для сравнения используются корреляционный кривые, полученные на Сибирском радиогелиографе 4-8 ГГц.

В ходе создания системы решались задачи чтения, калибровки, предварительной обработки, построения динамических радиоспектров для интенсивности и круговой поляризации и компоновки данных, полученных с разных инструментов с учетом широкого диапазона частот и большого диапазона интенсивностей. Обсуждаются возможности использования разрабатываемого ресурса для исследований геоэффективных событий.

ВЛИЯНИЕ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ НА ДЕФОРМАЦИЮ ВНЕШНЕГО И ФОРМИРОВАНИЕ СОБСТВЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ОБЛАСТИ РАСПАДА СИЛЬНОГО РАЗРЫВА В ПЛАЗМЕ С ГОРЯЧИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Кочаровский В.В.[1, 2], Гарасёв М.А.[1], Нечаев А.А.[1], Степанов А.Н.[1], Кочаровский Вл.В.[1]

1 ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru
2 Dept. of Physics and Astronomy, Texas A&M Univ., College Station, USA

В недавней работе [1] были проанализированы особенности распада сильного разрыва в бесстолкновительной плазме, образованного на границе двух областей плазмы с существенно различными концентрациями и многократно отличающимися температурами электронов. Подобная задача представляет интерес как для космической, так и для лабораторной (лазерной) плазмы. В частности, интересен мало исследовавшийся ранее случай, когда в области разрыва имеется достаточно сильное внешнее магнитное поле, влияющее на эволюцию области разрыва и формирование ударной волны в ней.

В настоящем докладе представлены результаты качественного анализа и численного моделирования указанной задачи, причём особое внимание уделено влиянию вейбелевской неустойчивости на деформацию внешнего и формирование собственного магнитного поля в области распада сильного разрыва. Установлены характерные особенности возникающей квазимагнитостатической турбулентности и её связь с анизотропией распределения горячих электронов в области фронта ударной волны.

Численное моделирование распада разрыва в плазме в присутствие внешнего магнитного поля проведено в рамках гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00268). Качественный анализ полученных результатов и их интерпретация для ряда типичных условий в космической и лазерной плазме выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-21029 мк).

1. Нечаев А. А., Гарасев М.А., Степанов А.Н., Кочаровский Вл. В., Физика плазмы. 2020. Т. 46, № 8. С. 694–713.

СВИСТОВЫЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Кузичев И.В., Васько И.Ю., Артемьев А.В

New Jersey Institute of Technology, г. Ньюарк, США, kuzicheviv@gmail.com

Тепловой поток электронов играет важную роль в процессах переноса энергии в бесстолкновительной или слабостолкновительной плазме солнечного ветра. Уже первые наблюдения показали, что столкновительный закон Спитцера-Харма не способен описать тепловой поток в солнечном ветре. В частности, наблюдения на 1AU показали, что тепловой поток подавляется до значений ниже столкновительного [1]. Были предложены различные механизмы регуляции теплового потока в солнечном ветре, например, взаимодействие электронов со свистовыми волнами, создаваемыми так называемой whistler heat flux instability (WHFI). Эта неустойчивость возникает в плазме с по крайней мере двумя встречно движущимися популяциями электронами. Недавние наблюдения продемонстрировали развитие WHFI в солнечном ветра, показав что эта неустойчивость генерирует преимущественно квазипараллельные свистовые волны с амплитудами до нескольких процентов от фонового магнитного поля [1,2]. Но вопрос о том, могут ли такие свистовые волны регулировать тепловой поток, оставался открытым.

Мы представляем результаты моделирования генерации свистовых и нелинейной эволюции WHFI с использованием одномерного PIC кода TRISTAN-MP. Этот код моделирует самосогласованную динамику двух встречных электронных популяций: теплых (core) электронов и горячих (halo) электронов. Мы исследовали генерацию волн в двух случаях: для чистого WHFI, когда обе популяции изотропны, и для анизотропного WHFI, когда электроны гало имеют перпендикулярную температурную анизотропию. Как хорошо известно из линейной теории, температурная анизотропия может сама по себе приводить к свистовой неустойчивости. В отличие от чистого WHFI, который генерирует квазипараллельные волны, анизотропная неустойчивость создает как параллельные, так и антипараллельные волны с одинаковыми инкрементами из-за симметрии функции распределения. При ненулевом тепловом потоке эта симметрия нарушается, но, тем не менее, обе волны могут быть иметь существенные инкременты. При этом антипараллельные свистовые волны имеют особое значение, поскольку они могут резонансно взаимодействовать с более значительной частью электронов, переносящих тепловой поток [3].

Результаты нашего моделирования PIC показывают, что чистый WHFI не может регулировать тепловой поток [4], но анизотропный WHFI может способствовать подавлению теплового потока в солнечном ветре из-за генерации антипараллельных волн. Мы также обнаружили, что существует корреляция между амплитудами волн в насыщении и линейными инкрементами, что согласуется с данными наблюдений.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00179

1. Tong Y. et al. // ApJ 2019. **878.** 41. doi: 10.3847/1538-4357/ab1f05
2. Tong Y. et al. // ApJL 2019. **870.** L6. doi: 10.3847/2041-8213/aaf734
3. Vasko I.Y. et al. // Physics of Plasmas 2020. **27**. 082902. doi: 10.1063/5.0003401
4. Kuzichev I.V. et al. // ApJ 2019. **882**. 81. doi: 10.3847/1538-4357/ab3290

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИЛИНЕЙНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ В ЗАДАЧЕ О ВИСТЛЕРНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Шевелёв М.М.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, mposimba@gmail.com

Квазилинейная теория описания резонансных процессов обмена энергией между электромагнитными колебаниями и заряженными частицами в плазме успешно используется для анализа широкого спектра процессов в лабораторной и околоземной плазме. Сегодня невозможно представить долговременный анализ динамики радиационных поясов и слаботурбулетной плазмы солнечного ветра без привлечения аппарата квазилинейной теории. В сравнении с методами прямого численного моделирования, такими как Particle-In-Cell, квазилинейная теория позволяет рассматривать процессы на временных масштабах порядка обратной линейной скорости роста, что существенно повышает возможности численного анализа процессов на длительных временах.

Очень часто численное моделирование квазилинейного диффузионного процесса в фазовом пространстве проводится не самосогласованным образом: эффективные коэффициенты диффузии выбираются исходя из априорных данных, в частности из эксперимента, и не изменяются в ходе моделирования. Такой подход хорошо зарекомендовал себя в задачах об изменении энергетического спектра в радиационных поясах. Однако в задачах, связанных со спектрами неустойчивых колебаний, требуется корректно отражать влияние амплитуд волн на скорость процесса. Возникает необходимость создания вычислительных инструментов, опирающихся на самосогласованную квазилинейную теорию.

Настоящая работа посвящена вычислительному коду для численного моделирования самосогласованной квазилинейной системы уравнений, созданному и протестированному с целью качественного и количественного анализа вистлерной неустойчивости теплового потока в солнечном ветре. Код позволяет выполнять вычисления на высокопроизводительных устройствах с технологией NVidia-CUDA. Ускорение вычислений достигается за счёт использования схем переменных направлений (alternating direction implicit), допускающих очень простое распараллеливание на большое количество потоков с общей памятью. Основными особенностями кода являются: учёт перекрёстных производных в основном диффузионном уравнении квазилинейной теории, что особенно важно в задачах, где устранение этих членов невозможно с помощью замены координат, и возможность самосогласованного изменения коэффициентов диффузии в ходе моделирования.

В работе представлены тестовые расчёты развития неустойчивости теплового потока, необходимые для верификации кода и демонстрирующие возможности по анализу долговременной эволюции самосогласованной квазилинейной системы уравнений.

Работа выполнены в рамках темы «Плазма» в Институте космических исследований РАН.

Анализ когерентных электростатических структуры на головной ударной волне

С.Р. Камалетдинов[1,2], И.Ю. Васько[3,1], Е.В. Юшков[1,2], А.В. Артемьев[1,4]

[1] *Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия*
[2] *Физический факультет, Московский Государственный Университет, Москва, Россия*
[3] Space Science Laboratory, University of California, Berkeley, California, USA
[4]*University of California, Los Angeles, California, USA*

Головная ударная волна Земной магнитосферы представляет собой естественную лабораторию для изучения процессов и, в частности, различных типов волновой активности в сверхкритических бесстолкновительных ударных волнах. Измерения спутника Wind показали, что одним из типов электростатических флуктуаций на ударной волне являются солитоноподобные структуры с биполярным профилем параллельного электрического поля и длительностью в несколько миллисекунд. Однако, измерения спутника Wind не позволили установить природу данных структур и, кроме того, были ограничены анализом небольшого числа событий (несколько десятков). В настоящей работе, на основе измерений спутниковой миссии Magnetospheric Multiscale в десяти пересечениях головной ударной волны, проведён статистический анализ электростатических солитоноподобных структур с положительным потенциалом. Собрана статистика из 101 структуры, получены оценки параметров данных структур (масштабы, скорости, амплитуды) и установлено, что данные структуры являются электронными дырками. Показано, что наблюдаемые электронные дырки, вообще говоря, нарушают критерий трансверсальной (поперечной) устойчивости и получены оценки времени жизни данных структур. Обсуждаются механизмы генерации электронных дырок на ударной волне.

НЕЛИНЕНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ДИНАМИКЕ КВАЗИМАГНИТНОСТАТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Гарасев М. А., Деришев Е. В., Кузнецов А. А., Кочаровский Вл. В.

ИПФ РАН, г. Н.Новгород, Россия, garasev@appl.sci-nnov.ru

С помощью нового подхода к численному моделированию развития вейбелевской неустойчивости в анизотропной бесстолкновительной плазме проведен детальный анализ возникающих нелинейных эффектов на разных этапах рассматриваемого процесса. Как ожидалось, наиболее важное влияние нелинейные эффекты оказывают на стадии насыщения, приводя к появлению крупномасштабных слабозатухающих магнитных полей и согласованного с ними истощения анизотропии распределения частиц по скоростям. Вместе с тем выяснилось, что нелинейные эффекты для вейбелевской неустойчивости всегда малы в том смысле, что нелинейное взаимодействие отдельных мод (пространственных гармоник) между собой не может непосредственно изменить динамику магнитного поля на стадии роста и насыщения, но оказывается принципиально важным для оценки скорости затухания поля. При этом в широкой области параметров нерелятивистской плазмы возникающая вейбелевская турбулентность является слабой, а пространственный масштаб магнитных структур меньше гирорадиуса типичных тепловых частиц. Таким образом, движение большинства частиц определяется в основном глобальными статистическими свойствами магнитного поля, а не локальной геометрией отдельных филаментов.

Полученные результаты представляют интерес для интерпретации ряда явлений в ударных волнах в неравновесной космической плазме, а также для анализа экспериментов с фемтосекундной лазерной плазмой.

Работа В.В. Кочаровского и А. А. Кузнецова была поддержана фондом БАЗИС, грант Leader 20-1-1-37-2. Работа М. А. Гарасева выполнена при поддержке гранта РНФ 19-72-10111.

ПРОБЛЕМА ГЕЛИЕВЫХ ВСПЫШЕК, РАДИУС ЭЛЕКТРОНА И НЕОБЫЧНЫЕ ИОНЫ В ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Лаптухов А.И.

ИЗМИРАН г. Москва, Россия, a.laptukhov@mail.ru

Наблюдаемое [1] увеличение в сотни и тысячи раз изотопа He^3 в космических лучах в течение гелиевых вспышек по сравнению с обычными невозможно объяснить ни ядерными реакциями[1], ни другими физическими процессами, в том числе и неизвестным механизмом выноса He^3 из глубоких недр Солнца [1] и их последующего гипотетического механизма ускорения, более эффективного по сравнению с ускорением как альфа частиц He, так и протонов. Поэтому наблюдаемые частицы это, по-видимому, не He^3, а новые теоретически возможные частицы (*pepp*) с зарядом Z=2 и массой m=3, как у He^3. Частица (*pepp*) представляет собой электрон *e* с размером $R_e=h/(m_ec)\sim10^{-12}$ м [2], внутри объёма которого покоятся три почти точечные протона с размером $R_p=h/(m_pc)\sim10^{-15}$ м. С учётом конечного размера электрона существование таких частиц, также как и частиц (*ep*), (*pep*), (*epe*), (*eepe*), (*epepe*), (*e*He), (*e*He*e*), (*ee*He*e*), (*ee*He*eee*) и др., теоретически обосновано в рамках теории [3], способной описать структуру электрона. В приближении точечного электрона невозможно статическое существование всех этих частиц, названных в работе [3] для краткости эядрами (электрон-нуклонными ядрами). Частицу (*epe*) с размером $\sim2R_e$ и энергией связи ~кэв не надо путать с ионом водорода H^-=[e+p+e] с размером $R_a\sim10^{-10}$ м и энергией связи ~эв. Частица (*pepp*) в солнечном ветре может интенсивно поглощать фотоны от Солнца и излучать их энергию в виде электромагнитных волн во всех направлениях, ускоряясь при этом за счёт импульса фотонов. Это и есть искомый механизм ускорения как бы «He^3».

Заметим, что частицы с зарядом Z=-2 и массой m=1, как у (*eepe*), наблюдались в эксперименте [4], в котором авторы предполагали распад отрицательного иона молекулы водорода H_2^- на протон $p=H^+$ и ион H^{--}=[e+p+e+e], что сомнительно, так как стабильных ионов с Z=-2 в природе нет. При измерении отрицательных ионов в солнечном ветре, например таких, как H^-, O^-, C^-, (*epe*), (*eepe*), (*ee*He*e*), (*ee*He*eee*) их можно отделить от электронов с помощью магнитного поля и поэтому эта экспериментальная проблема не более трудная, чем уже выполненные измерения положительных ионов в плазме солнечного ветра.

Надёжное обнаружение в солнечном ветре необычных отрицательных ионов, таких как (*eepe*), (*epepe*), (*ee*He*e*) будет важным открытием XXI века, после которого эпоха углеродной энергетики закончится и на смену ей придёт электронная энергетика [3] с характерной величиной выделяемой энергии не эв (химическая) и не Мэв (ядерная), а кэв. Это согласуется с экспериментальными измерениями выделяемой избыточной энергии в среднем 16 кэв на один атом водорода [5] и с теоретическими расчётами энергии, выделяемой при образовании простейшего и основного электрон-нуклонного ядра (*ep*), равной 12 кэв [3].

1. Кочаров Г.Е. О загадках Солнца. www.kosmofizika.ru/abmn/kocharov/kocharov2.htm
2. Лаптухов А.И., Рухадзе А.А. // Инженерная физика. 2015. №3. С. 19-23.
3. Лаптухов А.И. Электродинамика неточечных частиц и электронная энергетика// Инженерная физика. 2019. №6. С.34-41. DOI:10.25791/infizik.06.2019.669
4. Хвостенко В.И., Дукельский В.М. ЖЭТФ. Т.34. №4. 1958.
5. Iwamura Y. and 6 other // J. Condensed Matter Nucl. Sci. 33 (2020) 1–13.

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ МУЛЬТИТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ

Флейшман Г.Д., Кузнецов А.А., Landi E.

New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA, gfleishm@njit.edu

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Тепловая плазма солнечной атмосферы содержит очень широкий диапазон температур – от нескольких тысяч до миллионов К. Такая плазма часто описывается, и в наблюдениях и в моделях, в терминах Дифференциальной Меры Эмиссии (ДМЭ), где ДМЭ – это распределение квадрата электронной плотности по температурам. В наблюдениях ДМЭ вычисляется вдоль луча зрения, тогда как в моделях – в расчете на элементарный объем (воксель). Такое описание мультитемпературной плазмы весьма удобно и широко применяется при анализе и моделировании вакуумного ультрафиолетового (УФ) и рентгеновского излучений (РИ), которые в солнечной короне имеют оптически тонкий характер. Однако, в радио диапазоне теория излучения, опирающаяся на ДМЭ, отсутствует. Сложность создания такой теории, по сравнению с УФ и РГ, состоит в том, что (1) оптическая толщина радиоизлучения может быть большой; (2) работают по крайней мере два различных механизма излучения; и (3) важны плазменные эффекты.

Мы разработали теорию радиоизлучения для мультитемпературной плазмы, которая включает два механизма излучения – тормозное и гирорезонансное (циклотронное). Это, более точное описание потребовало и более точного учета остальных факторов, влияющих на излучение. В случае тормозного излучения, это (1) учет элементного состава; (2) учет зависящей от температуры ионизации ионов (их вклад не мал; например, столкновение электрона с ядром железа приводит к излучению более чем в 600 раз более интенсивному, чем столкновение с протоном); вклад столкновений с нейтральными атомами; (4) точные значения фактора Гаунта и (5) влияние магнитного поля. Для гирорезонансного механизма требуется введение другой физической величины, характеризующей мультитемпературную плазму, Дифференциальную Меру Дисперсии (ДМД), которая описывает распределение плотности электронов (а не ее квадрата) по температурам.

В данном сообщении мы даем описание основных элементов новой теории и созданного на ее основе кода, а также – приводим примеры синтезированных спектров и радио изображений. Результаты вычислений по новой теории значимо отличаются (от процентов до нескольких раз) от результатов вычислений по классической теории.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИТНЫХ ПОГЛОЩЕНИЙ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА HD-189733B В ЛИНИИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО ГЕЛИЯ

Руменских М. С., Березуцкий А. Г., Шайхисламов И. Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, marina_rumenskikh@mail.ru

Экзопланеты типа «горячих юпитеров» являются популярными объектами астрономических наблюдений. Эти планеты обладают большим радиусом, а также вращаются достаточно близко к родительским звездам, из-за чего их атмосфера ионизуется и нагревается, образуя расширяющуюся плазменную оболочку вокруг планеты. Благодаря этим особенностям транзиты таких планет достаточно глубокие и обладают коротким периодом, что позволяет детектировать их с достаточной точностью на протяжении небольшого времени.

Спектральные наблюдения в водородной линии Ly-α проводились для ряда экзопланет. Данные измерения позволили обнаружить ряд эффектов, происходящих при взаимодействии планетарного вещества с излучением и ветром родительской звезды, например, истекание атмосферного вещества за полость Роша [1], перезарядку протонов звездного ветра на планетарных атомах [2], охлаждение атмосферы молекулами H_{3+} [3] и т.д. Однако линия Ly-α поглощается при прохождении через межзвездную среду, а также подвергается искажению за счет геокорональной эмиссии, что делает невозможным ее регистрацию посредством наземных телескопов.

Использование линии метастабильного гелия λ=10830 Å для исследования атмосфер «горячих юпитеров» с использованием транзитных измерений было предложено в [4]. Участок спектра в области 10830 Å достаточно интенсивен в звездном спектре, хорошо регистрируется наземными телескопами, и не претерпевает значительных искажений, проходя через межзвездную среду. Данные, полученные в ходе транзитных наблюдений, помогут оценить такие параметры, как температура, давление и плотность верхней планетарной атмосферы, испытывающей газодинамическое истечение.

В настоящей работе представлено исследование сложных процессов возбуждения и депопуляции уровня 2^3S метастабильного гелия в атмосферах горячих экзопланет. Интерпретация поглощения в линии 10830 Å требует 3D-моделирования, включая взаимодействие истекающего планетарного вещества со звездным ветром, которое в настоящей работе продемонстрировано на примере «горячего юпитера» HD-189733b.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 18-12-00080, проектов Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № АААА-А17-117021750017-0, 075-15-2020-780, а также в рамках проекта "Исследование звезд с экзопланетами" по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований, проводимых под руководством ведущих ученых (соглашение N 075-15-2019-1875). Работа поддержана проектами РФФИ 20-02-00520, 19-02-00993 и 18-29-21018.

1. Vidal-Madjar A., Des Etangs A. L., Désert J. M., Ballester G. E., Ferlet R., Hébrard G., & Mayor M. // Nature 2003 422(6928), 143-146.
2. Khodachenko M. L. et al. Global 3D Hydrodynamic Modeling of In-transit Lyα Absorption of GJ 436b //The Astrophysical Journal. – 2019. – Т. 885. – №. 1. – С. 67.
3. Shaikhislamov I. F., Khodachenko M. L., Lammer H., Berezutsky A. G., Miroshnichenko I. B., & Rumenskikh M. S. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2018 481(4), 5315-5323
4. Seager S., & Sasselov D. D. // ApJ 2000 537, 916

ДИАМАГНИТНАЯ ОБЛАСТЬ В ЭЛЕКТРОННОМ КИНЕТИЧЕСКОМ НЧ ОПИСАНИИ И КВАЗИПОПЕРЕЧНАЯ ОБЫКНОВЕННАЯ МОДА

В.М. Губченко

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия (ua3thw@appl.sci-nnov.ru)

Диамагнитные облака-каверны это неоднородная, динамичная плазменная э.м. токовая система (ТС) со структурой, образованной в результате амбиполярного разлета со сверхзвуковой скоростью сторонней плазмы от источника ее инжекции в фоновую плазму и расширяющейся вдоль и поперек внешнего магнитного (ВМ) поля [1].. Разлет вносит асимметрию и анизотропию и обобщенный э.м. импульс в открытую систему облака, которые определяем по форме функции распределения частиц (ФРЧ) этих компонент горячей плазмы. В ТС каверны облака наблюдается разномасштабная структура плазмы и полей, предполагаются достаточно высокие (закритические) значения электронного плазменного бета внутри каверны и достаточно низкие (докритические) на ее границе и фоновой плазме [2]. Критические значения электронного бета находятся в области значительно выше единицы, они определяются по масштабам пространственной дисперсии индукционной моды, определяемыми формой ФРЧ электронной компоненты плазмы. Такие облака становятся мощными источниками ускоренных индукционным полем потоков электронов. Создаются коллективные азимутальные и продольные к ВМ полю ТС, самосогласованно влияющие на всю структуру облака и поля в каверне.

При высоких, но докритических значениях бета внутри каверны электроны замагничены, но в их описании электронной МГД эффект резонансного ускорения электронов не может введен самосогласованно Мы обращаем внимание на НЧ обыкновенную моду в плазме, возбуждаемую разлетом, которая при квазипоперечном возмущении к ВМ полю подобна «кинетической» моде индукционного поля незамагниченной горячей плазмы. У моды электрическое поле направлено вдоль ВМ поля, это дает возможность свободного индукционного ускорения резонансных частиц и возбуждения тороидальной компоненты ТС каверны, введения эффективной проводимости. В МГД описании эта индукционная мода представлена как особенность показателя преломления на нулевой частоте, что соответствует циклотронному черенковскому резонансу в плазме в зоне непрозрачности. Особенность устраняется в кинетическом описании, определяя линию поглощения. Квазипоперечные возмущения с поляризацией НЧ необыкновенной моды описывают магнитодипольную компоненту ТС каверны со сверхзвуковой границей с толщиной МГД ионного скинового масштаба и могут описываться в МГД.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0035-2019-0002 "Волны, неустойчивости и структуры в лабораторной и космической плазме" и частично поддержана грантами РФФИ (№. 19_02_00704, № 20-02-00108), программой фундаментальных исследований РАН № КП19-270 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований".

1. D. Winske et al, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2019, v. 5, a. 51, pp 1-14. DOI: 10.3389/fspas.2018.00051

2. V. M. Gubchenko, Geomagnetism and Aeronomy, 2015.Vol. 55, No. 7, pp 831-845., 2015. DOI: 10.1134/S0016793215070099, No. 8, pp 1009-1025, 2015. DOI: 10.1134/S0016793215080101

Некоторые свойства и эволюционность решений для параллельных МГД ударных волн в бесстолкновительной плазме с тепловыми потоками

<u>В.Д.Кузнецов</u>, А.И.Осин

ИЗМИРАН, г.Москва, г.Троицк, Россия, kvd@izmiran.ru

Приводятся результаты анализа эволюционности параллельной МГД ударной волны в бесстолкновительной плазме с тепловыми потоками на основе ранее полученного решения в рамках 8-моментного МГД-приближения, когда скорость линейных волн зависит от величины и направления теплового потока. Определены области параметров перед фронтом ударной волны, для которых имеет место эволюционность быстрой и медленной ударной волны, а также сохранение физического смысла параметров плазмы за фронтом ударной волны.

1.Kuznetsov V.D., Osin A.I. // Physics Letters A 2020. V.**384**. № 12. p.126346.
2.Кузнецов В.Д., Осин А.И. // УФН 2020. Т.**190**. N.8. С.871.
3.Kuznetsov V.D., Osin A.I. // arXiv:2003.09928 [physics.plasm-ph]. 2020.
4.Kuznetsov V.D., Osin A.I. // Geomagnetism and Aeronomy 2020. V.60. No. 7. P.804.
5.Kuznetsov V.D., Osin A.I. // Physics Letters A 2018. V.**382**. p.2052.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ И МАГНИТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ ВБЛИЗИ ЛУННОЙ ОРБИТЫ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ ARTEMIS

Рунов А., Ангелопулос В., Артемьев А. В.

Университет Калифорнии, Лос Анжелес, США, arunov@igpp.ucla.edu

Кихас С.

Институт Космических Исследований Академии Наук Австрии, Грац, Австрия

Григоренко Е.

Институт Космических Исследований РАН, Москва, РФ

Физические процессы в плазменном слое магнитосферы Земли во многом определяют динамику магнитосферы в целом. Частицы, населяющие плазменный слой, конвектируют в сторону дипольного поля, увеличивая энергию за счет перемещения в более сильное магнитное поле. Помимо глобальной конвекции в электрическом поле, направленном с утра на вечер, резкое усиление конвекции, связанное с ускоренными потоками плазмы (bursty bulk flows, BBFs) в результате быстрой трансформации магнитной энергии в кинетическую и тепловую энергии плазмы, позволяет энергичным частицам проникать глубже в квази-дипольное магнитное поле и формировать плазменные популяции внутренней магнитосферы. Для понимания физики процессов в плазменном слое критически важно иметь наблюдения плазмы и магнитного поля на разных геоцентрических расстояниях. За последние две декады, плазменный слой на расстояниях R<40 RE (где RE — радиус Земли) был достаточно хорошо исследован многоспутниковыми миссиями. Плазменный слой на расстояниях R>40 RE остается мало изученным.

В 2010 - 2011 годах, два спутника THEMIS были переведены на около-лунную орбиту и образовали двух-спутниковую миссию ARTEMIS. С июля 2011 года два спутника ARTEMIS находятся на устойчивой экваториальной эллиптической орбите ~100 и 19000 км высоты от поверхности Луны. Вместе с Луной, ARTEMIS пересекает ночную часть магнитосферы в течение 3-4 дней в лунный месяц, что дает нам возможность исследовать характеристики плазмы и конфигурацию магнитного поля в плазменном слое на расстояниях 50<R<70 RE. Используя базу данных ARTEMIS, мы исследовали a) структуру плазменного слоя в спокойных условиях (AE<100 нТ, |Dst|<20 нТ, |V|<50 км/с), b) характеристики высокоскоростных потоков плазмы (|V|>100 км/с), включая ассоциированные магнитные структуры, c) конфигурацию токового слоя, и d) характеристики распределений ионов и электронов в плазменном слое и в пограничном плазменном слое (PSBL) на геоцентрических расстояниях 50<R<70 RE.

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ СО СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Лукин А.С.[1,2], Артемьев А.В.[3,1], Петрукович А.А.[1]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, as.lukin.phys@gmail.com*

[2]*НИУ ВШЭ, Факультет физики, г. Москва, Россия*

[3]*Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США*

Динамика электронов в хвосте магнитосферы Земли существенно изменяется из-за их рассеяния в окрестности магнитного экватора, где сильные градиенты магнитного поля формируют конфигурацию силовых линий магнитного поля с малым радиусом кривизны. Основную роль в таком рассеянии играет токовый слой хвоста магнитосферы, где конфигурация силовых линий магнитного поля наиболее благоприятствует эффективному рассеянию электронов. Простейшая конфигурация токового слоя с единственным минимумом радиуса кривизны в окрестности экваториальной плоскости хорошо изучена в контексте рассеяния электронов. Однако наблюдения современных космических аппаратов указывают на существование токовых слоев, которые характеризуются силовыми линиями магнитного поля с внеэкваториальными минимумами радиуса кривизны. Данная работа посвящена изучению рассеяния электронов в таких конфигурациях. Мы используем модель магнитного поля, которая имеет две отдельные области с разными конфигурациями силовых линий: в одной из областей конфигурация магнитных полей характеризуется одним экваториальным минимумом радиуса кривизны, тогда как другая характеризуется тремя минимумами радиуса кривизны, два из которых внеэкваториальные. Параметры этой модели определяют масштаб градиента магнитного поля. Используя данную модель, мы исследуем зависимость интенсивности рассеяния электронов от питч-углов и конфигурации токового слоя. Аналитические результаты сравниваются с результатами моделирования тестовых частиц.

КАК ВОЗНИКАЮТ ТОКИ ОБРАТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В ТОКОВЫХ СЛОЯХ И К ЧЕМУ ПРИВОДИТ ИХ ПОЯВЛЕНИЕ

Франк А.Г., Сатунин С.Н.

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru

В работе С.И. Сыроватского [1] было показано, что в «нейтральных» токовых слоях наряду с основным электрическим током могут присутствовать токи обратного направления. Насколько нам известно, обратные токи впервые были зарегистрированы экспериментально в наших работах [2,3]. Токи обратного направления появляются на поздних стадиях эволюции токового слоя у его боковых краев, причем одновременно наблюдается уменьшение плотности тока и увеличение толщины токового слоя в его периферийных областях. До последнего времени вопрос о связи между этими явлениями оставался открытым.

В докладе обсуждаются динамические процессы в токовых слоях, которые вызваны движением направленных потоков плазмы в магнитном поле и возбуждением индукционных электрических полей. Установлено, что возникающие электрические поля неоднородны в пределах ширины токового слоя, что обусловлено неоднородным характером, как скоростей плазменных потоков, так и напряженности магнитного поля. У боковых краев слоя индукционные поля достигают максимальных значений, где они могут превысить по абсолютной величине начальное электрическое поле, которое инициировало формирование токового слоя [4]. Этот вывод согласуется с результатами эксперимента, в котором обратные токи действительно возникают у боковых краев слоя.

Показано, что момент появления обратных токов определяется интервалом времени, которое необходимо для ускорения плазмы. Время ускорения возрастает с увеличением массы ионов, что соответствует более позднему появлению обратных токов при формировании токового слоя в плазме с более тяжелыми ионами.

Установлено, что сравнительно быстрое уменьшение плотности тока и увеличение поперечных размеров, или «утолщение», токового слоя вдали от центральной области вызывается появлением токов обратного направления не только у боковых краев, но в пределах всего токового слоя. Обратные токи меньшей величины не регистрировались непосредственно, но проявлялись косвенным образом.

В областях токового слоя с обратными токами впервые зарегистрированы токи Холла противоположных направлений по сравнению с токами Холла на ранних этапах эволюции слоя. Показано, что направление сил, которые ускоряют ионы, также изменяется на противоположное, что должно приводить к торможению потоков плазмы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0024-2018-0045.

1. С.И. Сыроватский, ЖЭТФ **60**, 1727 (1971).
2. А.Г. Франк, С.Н. Сатунин, Физика плазмы **37**, 889 (2011).
3. A.G. Frank, N.P. Kyrie, S.N. Satunin, Phys. Plasmas **18**, 111209 (2011).
4. А.Г. Франк, С.Н. Сатунин, Письма в ЖЭТФ, **112**, 667 (2020).

АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОПАУЗЫ ПРИ НАЛИЧИИ ПРОТИВОТОКОВ КОМПОНЕНТ ПЛАЗМЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ ЧАСТИЦ

Нечаев А.А.[1], Гарасёв М.А.[1], Мишин А.А.[1], Тарасов С.В.[1], Кочаровский В.В.[1, 2], Кочаровский Вл.В.[1]

1 ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru
2 Dept. of Physics and Astronomy, Texas A&M Univ., College Station, USA

Предложена аналитическая модель распределенного токового слоя, разделяющего две области анизотропной бесстолкновительной плазмы с различными величинами магнитного поля и различными эффективными температурами распределений электронов и ионов по энергиям. Модель описывается суперпозицией функций распределения в виде произвольных изотропных функций энергии частицы, умноженных на ступенчатые функции Хевисайда от одной из проекций обобщённого импульса, и допускает наличие нескольких компонент ионов с различными эффективными температурами и разнесенными в пространстве локализованными встречными токами этих компонент.

Показано, что от конкретного вида энергетического распределения частиц (максвелловского, каппа и других) зависят количественные, но не качественные свойства построенных моделей. Слои, содержащие несколько фракций частиц с противотоками, сдвинутыми друг относительно друга в пространстве и обладающими разными масштабами, допускают многократное немонотонное изменение магнитного поля, при этом величина магнитного поля и полная концентрация плазмы могут нарастать в одном направлении. Общая толщина слоя определяется величинами сдвигов между токами фракций с наибольшим энергосодержанием и типичными гирорадиусами частиц этих фракций.

Проведено моделирование методом частиц в ячейках построенных аналитически магнитных переходных слоёв в одномерной и двумерной геометриях. Продемонстрирована стабильность простейших моделей рассматриваемого класса, что согласуется с качественными оценками устойчивости относительно возмущений вейбелевского типа.

Предложенные модели дают возможность интерпретации на их основе новейших данных спутниковых наблюдений многокомпонентных токовых слоев в областях головной ударной волны и магнитопаузы, магнитных облаков солнечного ветра и высоких корональных магнитных структур и проводить анализ тонкой структуры этих слоев с учетом наблюдаемых надтепловых, неравновесных фракций частиц.

Построение аналитических моделей токового слоя на магнитопаузе и исследование его структуры выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-12-10528). Исследование устойчивости токовых слоев выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00268).

1. Кочаровский В. В., Кочаровский Вл. В., Мартьянов В. Ю., Нечаев А. А. Аналитическая модель токовой структуры границы магнитослоя в бесстолкновительной плазме // ПАЖ. 2019. Т. 45, № 8. С. 591–604.
2. Кочаровский Вл. В., Кочаровский В. В., Нечаев А. А. Аналитическая модель магнитопаузы в многокомпонентной бесстолкновительной плазме с каппа-распределением частиц по энергиям // ДАН. Физика, технические науки. 2021. Т. 496. В печати.

МЕТАСТАБИЛЬНОСТЬ И ВЗРЫВНОЕ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Л.М. Зелёный[1], Х.В. Малова[2,1], В.Ю. Попов[3,1], Е.Е. Григоренко[1]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*
[2] *НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, hmalova@yandex.ru*
[3]*Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

Исследование тонких токовых структур в космической плазме, с толщинами порядка протонных гирорадиусов, положено пионерскими работами Сыроватского, Спейсера и других выдающихся ученых, предположивших, что в космической плазме существуют пограничные тонкие токовые слои [1], которые могут играть ключевую роль в динамике магнитосферы Земли и короны Солнца. Развитие этих работ диктовалось необходимостью объяснить вспышки на Солнце и магнитосферные суббури, при которых фазы эволюционного развития системы сопровождаются взрывными, спонтанными процессами с высвобождением свободной энергии. Академик Галеев, активно занимавшийся исследованиями в области космической плазмы, внес определяющий вклад в исследования магнитного пересоединения: объяснил динамику магнитного пересоединения в планетных магнитосферах, исследовал устойчивость токовых слоев к разрывной (тиринг-) моде, объяснил процессы генерации быстрых ионных потоков с энергиями в несколько МэВ в хвосте магнитосферы Земли. В настоящей работе предложено развитие идеи метастабильности, заложенной в работе Галеева и Зеленого [2]: представлена новая модель вложенного токового слоя с внутренним сверхтонким электронным слоем и двумя внешними токовыми слоями с протонами и ионами кислорода – носителями тока. Показано, что свободная энергия такой вложенной структуры в ограниченной области параметров системы может превышать свободную энергию токового слоя в хорошо известной модели Харриса, неустойчивой по отношению к длинноволновой тиринг-моде. Таким образом, вложенные тонкие токовые слои с тяжелыми ионами также могут быть метастабильными и запасать свободную энергию, достаточную для начала взрывного пересоединения в космической плазме.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 20-42-04418.

1. Zelenyi L.M. et al. // Plas. Phys. Rep., 2011. V. **37.** P. 118.
2. Галеев А.А., Зеленый Л.М. // ЖЭТФ, 1976, Т. **43**, С. 1113.

НАБЛЮДЕНИЕ СВЕРХТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЁВ НА СУБ-ИОННЫЫХ МАСШТАБАХ В ХВОСТЕ МАГНИТОСЕРЫ ЗЕМЛИ СПУТНИКАМИ MMS

Леоненко М.В.[1,2], Григоренко Е.Е.[1], Зеленый Л.М.[1], Малова Х.В.[3,1], Попов В.Ю.[4,1,5]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, elenagrigorenko2003@yandex.ru*

[2]*МФТИ, г. Долгопрудный, Россия*

[3]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия*

[4]*НИУ ВШЭ, Москва*

[5]*Физический факультет МГУ, Москва*

Миссия MMS позволяет наблюдать и исследовать структуру сверхтонких токовых слоев (СТС), полутолщина которых много меньше гирорадиуса тепловых протонов. Используя измерения магнитного поля и 3D функций распределения электронов с беспрецедентно высоким временным разрешением, мы исследовали структуру токового слоя хвоста во время распространения ускоренных плазменных потоков и сильного флэппинга токового слоя. Исследование более 100 быстрых пересечений токового слоя позволило выявить формирование сверхтонких интенсивных токовых структур, плотность тока в которых составляла несколько десятков нА/м^2, что почти на порядок выше плотности тока в невозмущенном токовом слое. Нами установлено, что практически весь ток в таких структурах переносится электронами. Полутолщина данных токовых структур составляла несколько десятков км, а в некоторых случаев была сопоставима с гирорадиусом тепловых электронов. Выполнено сравнение пространственных масштабов СТС с пространственным скейлингом, полученным в рамках новой модели тонкого токового слоя, учитывающей наличие вложенного сверхтонкого электронного слоя, и получено хорошее соответствие теоретического и наблюдаемого пространственных скейлингов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 20-42-04418

ДАННЫЕ ULYSSES И ОСЕСИММЕТРИЧНАЯ МГД-МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Маевский Е.В.[1,2], Малова Х.В.[2,3], Попов В.Ю.[1,2,4]

[1] *НИУ ВШЭ, Москва,* emaevskiy@mail.ru

[2] *ИКИ РАН, Москва*

[3] *НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына, МГУ, Москва*

[4] *Физический факультет МГУ, Москва*

В рамках построенной квазистационарной осесимметричной самосогласованной МГД-модели солнечного ветра [1], исследовано пространственное распределение характеристик магнитного поля и плазмы на радиальных расстояниях от 20 до 1200 радиусов Солнца. В модели учтены изменения магнитного поля Солнца в течение солнечного цикла, когда доминирующее дипольное магнитное поле сменяется квадрупольным и обратно. Получены самосогласованные численные решения для магнитного поля, скорости, температуры и плотности плазмы в солнечном ветре в зависимости от фазы солнечного цикла.

Проведено исследование характеристик солнечного ветра вдоль траектории космического аппарата Ulysses за время его полета вокруг Солнца (1992-2009). Показано, что результаты численного моделирования в целом согласуются с наблюдательными данными, полученными космическим аппаратом Ulysses. Сравнение модельных и экспериментальных данных показывает, что модель адекватно описывает параметры солнечного ветра и может быть использована для гелиосферных исследований в разные фазы цикла солнечной активности в широком диапазоне значений гелиошироты и гелиорасстояния.

Работа выполнена при поддержке гранта правительства Российской Федерации и Министерства высшего образования и науки РФ 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

1. Maiewski E.V., Kislov R.A., Khabarova O.V., Malova H.V., Popov V.Yu., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M. // *Astrophys. J.* 2020. V. **892.** No. 1. P. 1-17.

НОВЫЙ МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТОКОВЫХ СЛОЁВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Сагитов Т.М.[1], Хабарова О. В.[2, 3], Кислов Р. А.[2, 3]

[1]*НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, tmsagitov@edu.hse.ru*

[2]*ИЗМИРАН, г. Троицк, Москва, Россия*

[3]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Создан новый метод для автоматического поиска пересечения токовых слоёв в солнечном ветре, являющийся формализацией методики визуального выделения этих структур наблюдателями. Токовые слои чаще всего идентифицируют при помощи анализа характерных изменений в межпланетном магнитном поле (ММП) и плазменных параметрах с высоким разрешением. Известные визуальные и полуавтоматические эмпирические методы точны, но результатами их применения являются нерегулярные списки токовых слоев не более сотен или тысяч за несколько лет, в то время как аппарат может пересечь несколько тысяч токовых слоев только за сутки. Таким образом, для статистических исследований необходима автоматизация процесса выделения токовых слоев из данных наблюдений космических аппаратов in situ. Существующие автоматические методы идентификации токовых слоев частично решают эту проблему. Однако эти методы способны определить не все типы токовых слоев, так как они основываются лишь на анализе флуктуаций ММП и его направления, используя гипотезу Тейлора. Созданный нами трехпараметрический метод, основанный на анализе как изменения параметров ММП, так и плазмы, способен находить большее число типов токовых слоев. Проведено тестирование нового метода и его валидация путем сравнения с результатами других автоматических методик. Открытая база токовых слоев, идентифицированных на 1 а.е. за период в несколько лет, находится на https://csdb.izmiran .

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 20-42-04418.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СВОЙСТВ ТОКОВЫХ СЛОЁВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Хабарова О.В.[1,2], **Сагитов Т.М.**[2], **Кислов Р.А.**[1,2]

[1]*ИЗМИРАН г. Москва, г. Троицк, Россия, habarova@izmiran.ru*

[2] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

[3] *НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия*

Для анализа свойств токовых слоев использована первая открытая база токовых слоев, систематически идентифицированных на 1 а.е. за период в несколько лет по данным ACE (https://csdb.izmiran). Показано, что количество токовых слоев в сутки R варьируется от сотен до нескольких тысяч в день и определяется плотностью кинетической и тепловой энергии солнечного ветра с коэффициентом корреляции ~0.8-0.9. Максимум R приходится на турбулентные области – шис корональных выбросов масс (область за ударной волной) и области взаимодействия высокоскоростных потоков из корональных дыр с окружающим солнечным ветром.

Проведено исследование характеристик солнечного ветра, ассоциирующихся с токовыми слоями в потоках различной природы.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 20-42-04418.

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКОГО РАССТОЯНИЯ

Р.А. Кислов[1,2], О.В. Хабарова[2,1], Х.В. Малова[1,3]

[1] *ИКИ РАН, Москва, Россия*
[2]*ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия*
[3] *НИИЯФ МГУ, Москва, Россия*

На низких широтах в солнечном ветре магнитное пересоединение может носить как импульсный взрывоподобный характер, так и быть медленным квазистационарным. Квазистационарное пересоединение возможно при величине затекающего потока массы не более критического значения, зависящего от модели пересоединения. Исследовано изменение режима магнитного пересоединения с расстоянием от Солнца. По данным аппаратов Voyager 2 и Ulysses проведены оценки зависимости критического потока от гелиоцентрического расстояния для двух моделей пересоединения. Из сравнения реального потока вещества с оценками его критических значений сделан вывод, что режим магнитного пересоединения меняется с квазистационарного на нестационарный между орбитами Марса и Юпитера. Согласно полученным оценкам, первый тип магнитного пересоединения характерен для ближней гелиосферы, а нестационарное пересоединение преобладает в дальней и средней гелиосфере. Орбита Земли находится в переходной зоне, где возможны оба типа. Полученный результат важен для интерпретации наблюдений и моделирования, поскольку от типа пересоединения зависят пространственные масштабы наблюдаемых токовых структур и особенности развития турбулентности.

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 20-42-04418.

СИММЕТРИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ВОЗБУЖДАЕМОГО СФЕРИЧЕСКИМ ДИНАМО ЭКЗОПЛАНЕТ И ИХ ЗВЕЗД

Соколов Д.Д., Малова Х.В., Юшков Е.В.

МГУ, ИЗМИРАН, ИКИ, г. Москва, Россия, sokoloff.dd@gmauil.com

Исходя из симметрии источников крупномасштабного магнитного поля конвективной сферической оболочки в экзопланете и соответствующей звезде, мы рассматриваем возможные типы магнитных полей в этих объектах и структуру связанных с ними токовых слоев. Кроме привычной структуры токовых слоев дипольного магнитного поля, в задаче могут возникать и токовые слои, связанные с магнитными полями квадрупольной симметрии и с магнитными конфигурациями смешанной симметрии. Работа выполнета в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской федерации (проект N075-15-2020-780).

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА И УСКОРЕНИЯ КРИПТОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В ЛАБОРАТОРНЫХ ТОКОВЫХ СЛОЯХ

Кирий Н.П.

Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, natalya.kyrie@yandex.ru

Работа посвящена экспериментальному исследованию эволюции процессов нагрева и ускорения плазмы с тяжелыми ионами, когда токовые слои формируются с большей задержкой и существенно медленнее, чем в более легких благородных газах: гелии и аргоне [1-3].

Исследования проводились на установке ТС-3D спектральными методами. Токовые слои создавались при разряде в криптоне в магнитных полях с Х-линией, градиент поперечного магнитного поля составлял ~ 0.6 кГс/см, начальное давление газа ~ 30 мТорр, амплитудное значение электрического тока в слое - 45 кА. Эксперименты проводились как в 2D, так и в 3D магнитных конфигурациях, в которых вдоль нулевой линии прикладывалось однородное магнитное поле с индукцией ~ 3 кГс [3].

Температура и энергия направленного движения ускоренных ионов криптона определялись по доплеровскому уширению спектральных линий ионов криптона: Kr II 473.9 нм и Kr III 501.6 нм, которые регистрировались одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях по отношению к токовому слою. Температура электронов оценивалась из сопоставления времен разгорания тех же спектральных линий с временами ионизации соответствующих ионов [4].

Показано, что максимальные температуры ионов Kr II и Kr III составляют $T_i^{max} \approx 125 - 95$ эВ, а электронов - $T_e^{max} \approx 5 - 7$ эВ, при формировании токовых слоев в 2D и 3D магнитных конфигурациях, соответственно. Максимальную энергию в процессе ускорения приобретают ионы Kr II в 2D магнитных конфигурациях, $W_x^{max} \approx 420$ эВ.

Установлена последовательность процессов нагрева и ускорения в криптоновой плазме. Показано, что при формировании токового слоя в 2D магнитной конфигурации одновременно с началом прохождения тока начинается нагрев электронов, затем происходит ускорение плазмы, и в те моменты времени, когда энергия направленного движения ускоренной плазмы достигает максимума, начинается нагрев ионов. Ионы криптона достигают максимальной температуры к моменту завершения формирования токового слоя, когда плотность плазмы в слое достигает максимальной величины [5]. Э
зависимости качественно свидетельствуют о том, что в токовом слое электроны нагреваются за счет джоулевой диссипации, а ионы – благодаря термализации скоростей плазменных течений, сгребающих начальную плазму в пределы слоя.

Показано, что при формировании токового слоя в 3D магнитной конфигурации нагрев электронной и ионной компонент плазмы и ускорение плазмы происходят в другой последовательности, которой соответствует, по-видимому, другой механизм нагрева ионов, для изучения которого потребуются дополнительные исследования.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0024-2018-0045 "Фундаментальные проблемы динамики, удержания и нагрева плазмы в трехмерных магнитных конфигурациях".

[1]. Н.П. Кирий, В.С. Марков, А.Г. Франк // Письма в ЖЭТФ 2012. Т.95. С.17.
[2]. Кирий Н.П., Франк А.Г., Васильков Д.Г. // Физика плазмы 2019. Т. 45. С. 313.
[3]. A.G. Frank, N.P. Kyrie // Plasma Phys. Rep. 2017. V.43. P.696.
[4]. Кирий Н.П., Савинов С.А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 436.
[5]. Богданов С.Ю., Дрейден Г.В., Марков В.С., Островская Г.В., Франк А.Г. // Физика плазмы. 2006. Т.32. С. 1121.

ВЕЙБЕЛЕВСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ КВАЗИМАГНИТОСТАТИЧЕСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В УСЛОВИЯХ СРАВНИМОГО ЭНЕРГОСОДЕРЖАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ИОНОВ: АНИЗОТРОПИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ, ИХ БАУНС-ОСЦИЛЛЯЦИИ И ДИНАМИЧЕСКИЙ СПЕКТР ТОКОВ

Кочаровский В.В.[1, 2], Бородачев Л.В.[3], Гарасёв М.А.[1], Коломиец Д.О.[3], Нечаев А.А.[1], Кочаровский Вл.В.[1]

1 ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru
2 Dept. of Physics and Astronomy, Texas A&M Univ., College Station, USA
3 МГУ, г. Москва, Россия

Для ряда проблем физики космической плазмы, например, связанных с формированием и эволюцией звёздного (солнечного) ветра, представляет интерес анализ развития вейбелевской неустойчивости в бесстолкновительной плазме с анизотропными электронами и ионами, обладающими сравнимым энергосодержанием. Первые численные исследования одного частного случая указанной неустойчивости и некоторые выявленные свойства квазимагнитостатической турбулентности, возникающей в результате долговременной эволюции подобной неравновесной плазмы, были опубликованы в работе [1] и докладывались на данной конференции три года тому назад.

С тех пор нами проведена серия гораздо более детальных численных расчётов подобной неустойчивости в различных характерных плазменных условиях и установлены новые важные особенности как совместного движения и баунс-осцилляций типичных электронов и ионов в эволюционирующей плазме с самосогласованным турбулентным магнитным полем, так и динамики пространственных спектров электронных и ионных токов. В настоящем докладе представлены обнаруженные физические закономерности и обсуждаются возможности их использования для объяснения некоторых свойств звёздного (солнечного) ветра.

Численное моделирование и качественный анализ полученных результатов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00268).

1. Бородачев Л. В., Гарасёв М. А., Коломиец Д. О., Кочаровский В. В., Мартьянов В. Ю., Нечаев А. А., Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 12. С. 1107.

РАСПАД СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ СОЛИТОНОВ И УСКОРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Трухачев Ф.М.[1,2], Петров О.Ф.[1,3], Васильев М.М. [1,3], Васильева Е.В.[1]

[1]*ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, ftru@mail.ru*

[2]*БРУ, г. Могилев, Беларусь*

[3]*МФТИ, г. Долгопрудный, Россия*

Детально исследована эволюция распада плоского пыле-акустического солитона в пылевом облаке в плазме тлеющего разряда. Экспериментально установлены как макроскопические, так и кинетические параметры плазмы в окрестности солитона. К первым относятся профили концентрации пыли и скорость движения волны, ко вторым - динамика отдельных пылевых частиц. Анализ макропараметров не позволил установить факт распада солитона. Однако изучив траекторий отдельных частиц была детальна исследована эволюцию солитона, включая его распад и появление многопотоковости. Установлено, что при достижении критической амплитуды фронт солитона ускоряет частицы до собственной скорости, которая значительно (на несколько порядков) превышает среднюю скорость частиц в невозмущенном состоянии. После распада солитона профили концентрации пыли некоторое время сохраняет свою структуру. Скорость движения этих профилей после распада также равна первоначальной скорости солитона. Достигая нижнего края пылевого облака структура полностью распадается, а ускоренные частицы выбрасываются далеко за пределы невозмущенного облака, приводя плазму в турбулентное состояние. Теоретическая интерпретация результатов эксперимента выполнена в рамках МГД модели, получены профили электрического потенциала и поля, а также профиль концентрации пыли. Распад солитона и появление многопотоковости не удалось описать МГД моделью. Однако использование одночастичного приближения на основе данных полученных из МГД теории позволили рассчитать основные параметры многопотоковости. Так получены траектории частиц и профили скорости распадающегося солитона. Рассмотрены как диссипативный, так и бездипассивный случаи. В первом случае скорость ускоренных частиц и скорость солитона равны, а сами частицы испытывают затухающие осцилляции при взаимодействии с волной, что полностью согласуется с результатами эксперимента. В бездисипативном случае частицы при распаде солитона ускоряются до скоростей вдвое превышающих скорость волны, что может быть важно при анализе турбулентности и неустойчивостей в бесстолкновительной плазме токомаков, космоса и т.д.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 19-12-00354

1. Trukhachev F. M., Vasiliev M. M., Petrov O. F., Vasilieva E.V. // Phys. Rev. E 2019 **100**, 063202

НУЖНА ЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ ДЛЯ УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ И ЕСЛИ ДА, ТО КАКАЯ?

Флейшман Г.Д.

New Jersey Institute of Technology, Newark, NJ 07102, USA, gfleishm@njit.edu

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26

Прогресс в рентгеновской диагностике ускоренных частиц в солнечных вспышках, главным образом нетепловых электронов по данным спутника RHESSI, привел к укреплению концепции о доминирующей роли стохастического механизма ускорения частиц турбулентностью. Классический механизм стохастического ускорения предполагает, что питч-угловое рассеяние заряженных частиц происходит гораздо быстрее, чем набор энергии. Это значит, что сначала частицы изотропизуются, и только потом – ускоряются. Однако, наблюдения с высоким (субсекундным) временным и пространственным разрешением не всегда согласуются с такой картиной: зачастую, частицы ускоряются до высоких энергий за очень короткое время, короче «пролетного» времени вспышечного источника, так что они просто не могут успеть изотропизоваться за то время, пока происходит их ускорение. Кроме того, новые наблюдения с использованием разрешающей микроволновой спектроскопии указывают на наличие очень сильных супер-Драйсеровских электрических полей в области ускорения частиц в солнечной вспышке, которые нетипичны для волновой МГД или плазменной турбулентности. Эти факты заставляют критически пересмотреть проблему ускорения частиц во вспышках. В данном сообщении я попытаюсь сформулировать основные требования к области ускорения частиц в солнечной вспышке, обсудить, нужна ли для этого ускорения турбулентность, и, если да, то какими свойствами она должна обладать.

DIFFERENTIAL ION HEATING BY ION-SOUND AND ALFVEN TUDBULENCE.

Savin S., Pallocchia G., Zelenyi L., Popov V., Budaev V., Koepke M.

[a]*ИКИ РАН, РФ, ssavin@iki.rssi.ru*

The prediction of Academician V.P. Silin [1] for differential ion heating we relate not only with the ion-acoustic turbulence, but also with Alfven waves, as we had demonstrated in space [2].

The ion differential heating can occur to become the valuable issue for fusion. [1] predicted that in a D – T laboratory devices: one component can support the ion sound turbulence, while another one will be anomalously heated by this turbulence. It could help a lot to ignite stable fusion.

In space the differential of H+ and He++ heating probably, starts in solar corona. I t proceeds at the foreshock and Earth's bow shock, and then in front of magnetopause and over outer cusp.

We put up the question: if ion-sound turbulence is the main payer for both space and fusion, or the nonlinear Alfvenic waves can do the most of the job?

In the CLUSTER data both types of waves correlate with the heating.

We also found examples of ion-sound waves together with the Alfven ones in the heating zones during recent re-analyzing of INTERBALL-1 data.

In the CLUSTER data in outer cusp throat we found very different He++/ H+ temperatures. The same for the nearest plasma sheet just under magnetopause. It suggests that namely the cusp throat is a general source for the plasma sheet!

1. V. P. Silin, Fiz. Plazmy 37, 739 (2011) [Plasma Phys. Rep. 37, 46 1 (2011).
2. S. P. Savin et al., in *Geospace Mass and Energy Flow: Results from the Internatioonal Solar-Terrestrial Physics Program, Geophysical Monograph 104*, Ed. by J.L. Horwitz, D.L. Gallagher, and W.K. Peterson(AGU, Washington D.C., 1998), pp. 25–44.

WAVELET ANALYSIS OF MAGNETIC ENERGY AND CURRENT HELICITY IN A SOLAR ACTIVE REGION

Kirill Kuzanyan, Rodion Stepanov, and Nobumitsu Yokoi

IZMIRAN, Moscow, Russia, kuzanyan@izmiran.ru
Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch (ICMM), Perm, Russia, rodion@icmm.ru
Institute of Industrial Sciences, Tokyo University, Tokyo, Japan

In this work we study Magnetic and cross helicity cascades in MHD turbulence, phenomenology and observational data analysis.
We outline Phenomenology of turbulent cascades, and Magnetic and cross helicity effects on spectra using Wavelet analysis. That enables us Tracing of MHD turbulence in sunspots records.
The results clarify the physics lying behind the observational phenomena: MHD turbulence under rotation and external magnetic field.

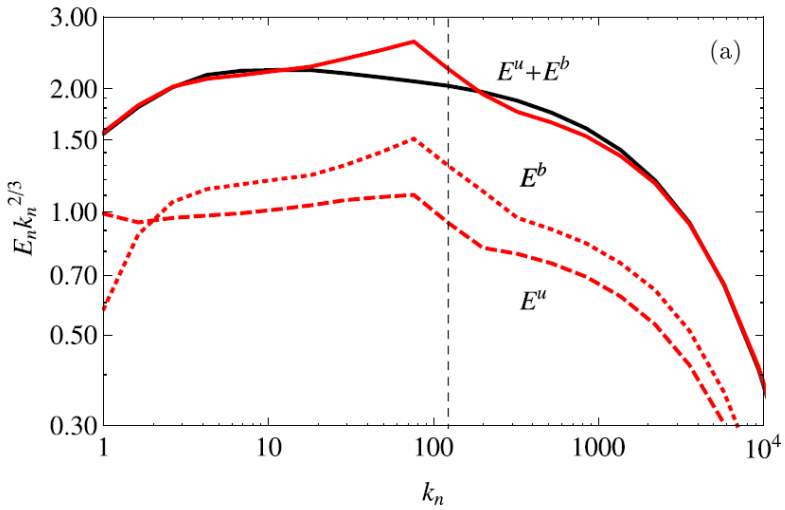
Properties of MHD turbulence can be assessed with

- high resolution observations
- advanced techniques for signal analysis.

We use advances of wavelet transform for scale analysis of magnetic energy and current helicity in an active region of the sunspots. We show spatial distributions of magnetic energy and current helicity at different scales. Inhomogeneity and local anisotropy are discussed.

Compensated energy spectra

Illustration of the mode-to-mode energy transfers. The gray triangles correspond to the interacting triads



ГЕНЕРАЦИЯ СРЕДНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТУРБУЛЕНТНОМ НЕОДНОРОДНОМ ПЛАЗМЕННОМ ПОТОКЕ

Юшков Е.В., Аллахвердиев Р., Камалетдинов С.Р., Соколов Д.Д.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yushkov.msu@mail.ru

Уравнение магнитной индукции, усредненное по статистически однородному случайному полю скорости, приводит к хорошо известной модели среднего поля, впервые предложенной Штеенбеком, Краузе и Рэдлером, [1]. Такая модель при наличии ненулевой гидродинамической спиральности описывает генерацию магнитной энергии в турбулентном потоке плазмы и является ключевой моделью в теории мгд-динамо. Традиционно вывод уравнения среднего поля, используемого для описания генерации полей звезд и галактик, требует предположения об однородности и двухмасштабности конвективного потока, [2]. В настоящей работе мы развиваем метод, предложенный Молчановым, Рузмайкиным и Соколовым и позволяющий провести вывод уравнения магнитной индукции с помощью мультипликативных интегралов и усреднения по пучку винеровских траекторий, [3]. Предложенный способ не требует введения гипотезы о пространственной двухмасштабности и позволяет получить базовое уравнение исключительно в предположении о коротких временных корреляциях. Но что более удивительно, он работает не только для однородного, но и для неоднородного турбулентного поля скорости, приводя к обобщению уравнения Штеенбека-Кразуе-Рэдлера и появлению турбулентного дрейфа. Описание данного дрейфа, впервые предсказанного еще в ранних работах Краузе, и является основной целью настоящей работы. Работа выполнена при поддержке фондом БАЗИС в рамках проекта № 18-1-1-77-3.

1. Steenbeck M., Krause F., Radler K.H. // Z. Naturforsch 1966. V. **21**.
2. Beck R., Brandenburg A., Moss D., Shukurov A., Sokoloff D. // ARAA 1996. V. **34**.
3. Молчанов С.А., Рузмайкин А.А., Соколов Д.Д. // УФН 1985. Т. **145**.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ С ПЕРЕМЕЖАЕМОСТЬЮ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ.

Левашов Н. Н., Попов В. Ю., Малова Х.В.

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, *г. Москва, Россия,* panterny@yandex.ru

Перемежаемость всегда наблюдается в потоке солнечного ветра и заключается в возникновении редких, но сильных всплесков в поведении электромагнитного поля. Для моделирования турбулентного электромагнитного поля с перемежаемостью используется комбинация турбулентного поля со степенным спектром в сочетании с полем, производимого равномерно распределенными небольшими плазмоидами [1].

Турбулентное электромагнитное поле со степенным спектром задается как ансамбль плоских волн: $B_z = B_0 \sum_s (1 + \mathrm{k_s}^2 \mathrm{L}^2)^{-\frac{5}{8}} \cos(\mathbf{kr} - \omega t + \varphi_s)$, где $\mathbf{k} = (\mathrm{k_x}, \mathrm{k_y}, 0)$ – волновой вектор, $\omega = \mathrm{C}\sqrt{\mathrm{k_x}^2 + \mathrm{k_y}^2}$, C - скорость света, L – размер рассматриваемой области.

Вторая часть поля задается путем разбиения моделируемой области на квадратные ячейки, в каждую из которых помещается один плазмоид. Поле i-го плазмоида задается при помощи векторного потенциала:

$$A_{xi} = A_{x0i} \exp\left(-k_c^2 (\mathbf{r} - \boldsymbol{r}_i)^2\right), A_{yi} = A_{y0i} \exp\left(-k_c^2 (\mathbf{r} - \boldsymbol{r}_i)^2\right),$$

$$A_{x0i} = {A_{0i}}\Big/{\sqrt{1 + \tan(\psi_i)^2}}, A_{y0i} = A_{x0i} \cdot \tan(\psi_i).$$

Где $\mathrm{k_c} = 8/\mathrm{l}$, l – размер пространственной ячейки, ψ_i – угол поворота i-го плазмоида, относительно оси Y=0, ${A_{0i}}^2 = {A_{y0i}}^2 + {A_{x0i}}^2$ - амплитуда векторного потенциаладля i-го плазмоида. Она задается следующим образом: $A_{0i} = a_0 \cdot \alpha^{-G}$, где G - Гауссова величина с единичной дисперсией и нулевым средним, α – параметр, для управления степенью перемежаемости.

Статистические моменты у величины, заданной таким образом будут равны: $\langle A^p \rangle^{1/p} = a_0 \cdot \alpha^p$. При значениях $\alpha > 1$, скорость роста моментов, с ростом p, должна неограниченно возрастать, что свидетельствует о наличии перемежаемости [2]. Из формулы для вычисления моментов видно, что чем больше значение α, тем быстрее растут статистические моменты, в зависимости от p. Таким образом, в нашей модели мы будем регулировать степень перемежамости путем изменения параметра α.

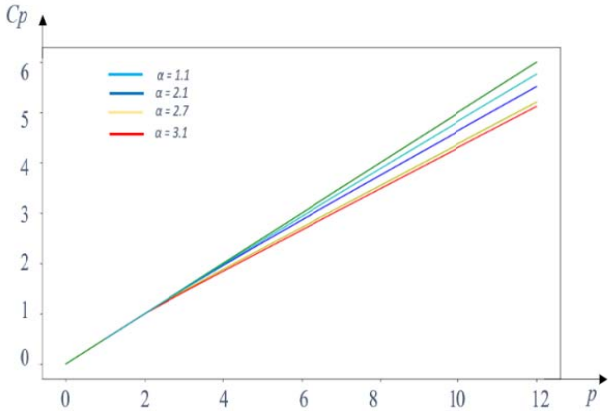


Рис 1. Зависимость показателя структурной функции *Cp* от степени *p*

Для верификации модели – рассчитаем компоненту магнитного поля вдоль оси X=Y и вычислим структурную функцию: $S_p = \sum_n |B_z(n+h) - B_z(n)|^p$, для различных показателей *p*. Показатели структурной функции *Cp* можно получить из выражения: $S_p \sim h^{Cp}$. Отклонение значений *Cp* от прямой *Cp~p*, при *p*>3 свидетельствует о наличии перемежаемости. На Рис.1 показан график зависимости *Cp(p)* для различных значений α.

Работа поддержана грантом РФФИ 19-02-00957

1. Zelenyi, L.M., S.D. Rybalko, A.V. Artemyev, A.A. Petrukovich, and G.Zimbardo // Geophys. Res. Lett. 2011.V. 38.P. 17110.
2. Я. Б. Зельдович, С. А. Молчанов, А. А. Рузмайкин, Д. Д. Соколов // УФН. 1987. Т 152.

ДИССИПАТИВНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СТРУКТУРЫ В ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ПОЛЯХ: АСИММЕТРИЯ ПОЛЯРНОСТИ

Иудин Д.И.

ИПФ РАН, г. Москва, Россия, iudin@ipfran.ru

Асимметрия полярности атмосферных электрических процессов, обусловленная резким контрастом подвижностей положительных ионов и свободных электронов, приводит к ярким макромасштабным эффектам в физике молнии: разряды на землю отрицательной полярности чаще всего состоят из серии ударов, проходящих по одному каналу, а положительные вспышки, как правило, ограничиваются одним ударом, отрицательные и положительные лидеры молниевых разрядов имеют существенные морфологические различия [1, 2], рост положительных лидеров сопровождается развитием отрицательных рекойл лидеров, а положительных рекойл лидеров, если они и существуют, никто не наблюдал. Последовательное описание механизмов макромасштабных проявлений асимметрии молниевого разряда вызывает сегодня значительные трудности. Вместе с тем, другим хорошо известным примером проявления асимметрии транспорта в потенциальном поле являются речные сети. Верхняя часть речной системы, контролируемая эрозионными процессами, и нижняя её часть, регулируемая седиментацией, существенно асимметричны: благодаря особенностям доминирующих процессов, дренажная плотность -- число каналов на единицу площади - превалирует в низовьях реки. Фундаментальным проявлением этой асимметрии является наличие у реки выделенного направления от истоков к устью с ростом расхода воды до точки равновесия, где отношения конкуренции ветвей главного русла сменяются их симбиозом с образованием речной дельты. В точке равновесия изменение уровня гравитационного потенциала под воздействием эрозии и седиментации меняет знак. Ключевой вывод состоит в том, что аналогичную дренажной плотности роль в случае молнии играет пространственная плотность распределения плазменных каналов разряда. Используя по аналогии с речными системами иерархическую схему Хортона – Штролера мы оценили структурную асимметрию пространственного распределения ёмкости разноимённых частей дерева разряда и связали скорость смещения точки нулевого индуцированного заряда или точки реверса с разностью периферийных токов. Обнаруженное смещение точки реверса определяет главное направление развития молнии, запускает механизм конкурентного подавления боковых ветвей положительного лидера, механизм обновления ветвей отрицательного лидера и служит ключом к объяснению макромасштабных проявлений асимметрии молниевого разряда.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №19-17-00183).

1. Iudin, D. I., V. A. Rakov, E. A. Mareev, F. D. Iudin, A. A. Syssoev, and S. S. Davydenko // J. Geophys. Res. Atmos. 2017. V. 122, doi:10.1002/2016JD026261.

2. Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A., Rakov V.A. // J. Geophys. Res. Atmos. 2020. V. 125, No. 7. P. e2019JD031360.

ПОТОК МАГНИТНОЙ СПИРАЛЬНОСТИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ СРЕДНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ахметьев П.М.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, pmakhmet@mail.ru

Уравнение среднего магнитного поля описывает процесс генерации магнитного поля на большом масштабе за счет ЭДС, возникающей на мелком масштабе. Рассматривается случай, когда магнитное поле на большом масштабе также случайно. Определяется функция плотности магнитной спиральности, которая инвариантна при калибровочном преобразовании магнитного вектор-потенциала. Изучается уравнение для потока магнитной спиральности крупномасштабного поля. Вводится поправочное слагаемое, связанное с инвариантом квадратичной магнитной спиральности.

1. П. М. Ахметьев, “Поток магнитной спиральности для уравнений среднего магнитного поля”, *ТМФ*, **204**:1 (2020), 130–141.

EVOLUTION OF COMPLEXITY OF THE PULSING AURORA PATTERNS OBSERVED BY FAST CAMERAS IN FENNOSCANDIA AND KOLA PENINSULA

Kozelov B. V.[1], Roldugin A.V.[1], Oyama S.[2,3,4], Miyoshi Y.[2]

[1] *Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk region, Russia*
[2] *Nagoya University, Nagoya, Japan*
[3] *National Institute of Polar Research, Tachikawa, Japan*
[4] *Ionosphere Research Unit, University of Oulu, Oulu, Finland*

Extended ground-based support of the ARASE satellite in Fennoscandia and Kola Peninsula include several all-sky cameras observed aurora with fine temporal resolution. The data have been analyzed to extract numerical characteristics of complexity of plasma dissipation processes leading to pulsing aurora. Evolution of the correlation dimension calculated by Grassberger-Procacci algorithm was traced during typical events. It was founded that in the beginning of the activation near midnight the correlation dimension is relatively small characterizing the main directed motion of plasma. Then, the complexity of the aurora pattern is increasing that means developing of dissipation in individual less correlated ducts.

The work of A.V. Roldugin has been supported by RFBR under grant no. 19-52-50025. The work of S. Oyama and Y. Miyoshi has been supported by JSPS KAKENHI JPJSBP120194814.

Q-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОТЯЖЕННОЙ АТМОСФЕРНОЙ ТРАССЫ КАК НЕАДДИТИВНОЙ СИСТЕМЫ

Сухарева Н.А., Бланк А.В., Цыганов М.В.
Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
suhareva@physics.msu.ru

Описана методика анализа в рамках неэкстенсивной термодинамики Тсаллиса экспериментально регистрируемых временных разверток для векторов смещения и скорости дрейфа энергетического центра коллимированного волнового пучка. Определяются вариации энтропии Больцмана-Гиббса, q-деформированной энтропии Тсаллиса и числа доступных состояний статистического ансамбля регистрируемых положений энергетического центра коллимированного волнового пучка и его скорости дрейфа. Для определения типа аттракторов исследуемого стохастического процесса анализируются спектры показателей Ляпунова для позиционных параметров волнового пучка.

Формулировка основных результатов исследования:

- Многомодальная функция распределения для регистрируемых реализаций компонент вектора смещения и вектора дрейфа центра энергонесущего коллимированного волнового пучка может быть обоснованием использования неэкстенсивной термодинамики Тсаллиса, позволяющей управлять долевым участием маловероятных и высоковероятных состояний. Термодинамика и кинетика сложных систем на основе q-деформированной энтропии Тсаллиса, где q -- мера неаддитивности, прогнозирует асимптотически степенные статистические распределения, переходящие в пределе **q – > 1** в экспоненциальные распределения. Именно такие характеристики наблюдаются в экспериментальных сериях.
- q-энтропия статистического ансамбля позиционных параметров информативна при оценке степени термической неравновесности многокомпонентной системы и может быть использована как мера нестационарности, пространственной неоднородности и неравновесности оптической трассы. При **q – > 0** значение энтропии Тсаллиса совпадает с числом доступных состояний исследуемого ансамбля, определяемых условиями пространственной дискретизации системы регистрации. Подобную характеристику целесообразно использовать для калибровки цифровых регистраторов.
- Рассмотренная методика анализа q-деформированных характеристик включает анализ эскортных распределений, кинетики вариации семейства q-энтропий и энергетических распределений. На основе эскортных распределений могут быть вычислены экспериментально наблюдаемые средние по ансамблю параметры, входящие в уравнения состояния и уравнение процесса -- средние q-плотность частиц газа, q-скорость дрейфа газа в трубке тока, q-плотность внутренней энергии.
- На микромасшабах времени в сотни миллисекунд значение максимального показателя Ляпунова сильно варьируется. Однако при переходе к масштабам более 1 секунды вариации затухают и относительно слабо меняются во времени в светлое время суток. Наблюдаемые положительные значения показателя Ляпунова позволяет отнести фазовые траектории позиционных характеристик к конкретному типу хаотического режима -- гиперхаосу.

Работа выполнена в рамках гостемы АААА-А17-117121890022-8 «Волновые пучки и импульсы в случайно-неоднородных и стратифицированных средах» . Исследование ghjdtltyj при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского университета «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

ИЗЛУЧЕНИЕ НА СТАДИИ ИНИЦИАЦИИ МОЛНИИ В ОБЛАКЕ: НАБЛЮДЕНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Сысоев А.А.[1, 2], **Иудин Д.И.**[1, 2, 3], **Караштин А.Н.**[1, 4]

[1]*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия,* zaratustrann@yandex.ru
[2]*Приволжский исследовательский медицинский университет, г. Нижний Новгород, Россия*
[3]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, Россия*
[4]*Научно-исследовательский радиофизический институт, г. Нижний Новгород, Россия*

Недавно для целого ряда грозовых систем в разных регионах планеты появились сообщения о наблюдении непрерывной последовательности кратковременных разрядов, случайным образом заполняющих зону сильного поля грозового облака. Отдельные разряды в последовательности имеют длительность намного меньше миллисекунды и пространственную протяжённость, не превышающую нескольких сотен метров. В течение периода грозовой активности эти разряды происходят каждые несколько миллисекунд. После развития внутриоблачного разряда частоты появления этих импульсов резко снижаются до нескольких разрядов в секунду, а затем вновь возрастают до нескольких сотен в секунду вплоть до возникновения следующей внутриоблачной молнии. Эти разряды-предвестники дискретны как во времени, так и в пространстве и локализуются очень близко к месту зарождения последующего внутриоблачного разряда.

В работе представлены результаты сравнения данных регистрации излучения грозы, происходившей 15 мая 2019 г. в Нижегородской области, и результатов численного моделирования процесса формирования лидера молнии в грозовом облаке. Экспериментальные данные были получены с помощью широкополосного радиоинтерферометра, принимающего излучение в диапазоне частот 0.1–30 МГц.

Использованная в работе численная модель была построена на принципах работы [1]. Она была применена к описанию процесса формирования лидера молнии в облаке в результате возникновения, роста и последующего слияния биполярных стримерных и лидерных систем.

Результаты моделирования были использованы для расчета производимого моделируемой системой токов электромагнитного излучения. Показано, что результаты расчетов находятся в хорошем согласии с данными экспериментальных наблюдений, причем наиболее интенсивные биполярные импульсы электрического поля с амплитудой порядка 0.1 В/м и длительностью порядка 0.2 мкс генерируются кратковременными мощными импульсами тока выравнивания потенциалов с амплитудой порядка нескольких сотен (до тысячи) ампер, возникающих при слиянии биполярных стримерных/лидерных систем. Акты слияния происходят естественным образом в результате электростатического притяжения положительного конца одного поляризованного во внешнем поле разрядного древа к отрицательному концу другого.

Результаты работы позволяют интерпретировать наблюдаемое излучение грозового облака как результат естественной динамики развития внутриоблачных разрядов. При этом стримерная активность может либо завершаться формированием лидерного канала, либо угаснуть до формирования лидера, если данный критерий не выполняется. Во втором случае принято говорить о так называемых предвестниках.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №19-17-00183 «Исследование процессов инициации и развития молниевых разрядов в атмосфере Земли».

1. Syssoev A.A., Iudin D.I., Bulatov A.A., Rakov V.A. // J. Geophys. Res. Atmos. 2020. V. **125**, No. 7. P. e2019JD031360.