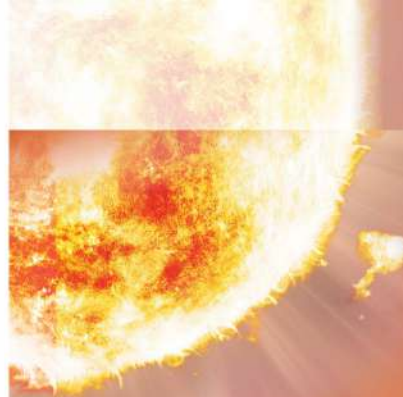




Российская Академия Наук

ИКИ

ИНСТИТУТ
КОСМИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
РАН

ПЯТНАДЦАТАЯ
ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ

10-14 февраля 2020

plasma2020.cosmos.ru

МОСКВА



Содержание

1. Пленарные доклады	3 - 6
2. Секция «Теория и наблюдение Солнца»	7 - 76
3. Секция «Ионосфера»	77 - 126
4. Секция «Магнитосфера»	127 - 168
5. Секция «Теория космической плазмы»	169 - 183
6. Секция «Солнечный ветер и гелиосфера»	184 – 217
7. Секция «Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли»	218 – 237
8. Секция «Волновые явления в космической плазме»	238 – 272
9. Секция «Прогноз космической погоды и прикладные вопросы физики магнитосферы и ионосферы»	273 – 319
10.Секция «Теория и наблюдение токовых слоев»	320 - 327
11.Секция «Турбулентность и хаос»	328 - 334

МИКРОВОЛНОВАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ

Флейшман Г.Д., Gary D.E., Chen B., Kuroda N., Yu S., Nita G.M.

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

Магнитное пересоединение играет ключевую роль в сильно замагниченных плазмах, в частности, - в солнечной короне. Выделение магнитной энергии благодаря пересоединению является, по-видимому, движущей силой таких явлений как солнечные вспышки, выбросы массы и джеты. Это энерговыделение должно сопровождаться уменьшением величины магнитного поля в короне. Для того, чтобы определить, где именно и с какой скоростью происходят изменения магнитного поля, нужны количественные измерения коронального магнитного поля, эволюционирующего во вспышке. Единственная существующая методика, позволяющая делать такие измерения основывается на микроволновой спектроскопии высокого разрешения. Эта методика использует разрешенные в пространстве многочастотные наблюдения гиротронного излучения, генерируемого нетепловыми электронами, ускоренными во время вспышки.

В данном сообщении мы описываем данную методику и приводим самые первые результаты ее применения к конкретным наблюдательным данным по вспышкам [1], зарегистрированным интерферометром EOVSА (Expanded Owens Valley Solar Array). Например, в хорошо известной солнечной вспышке 10 Сентября 2017, нами измерены пространственные и временные изменения магнитного поля в области каспа, между Х-точкой и релаксирующими (пост-)вспышечными петлями. Конкретно, в этой области магнитное поле затухает с темпом ~ 5 Гаусс в секунду в течение двух минут. Настолько быстрое затухание магнитного поля не совместимо со столкновительной (Спитцеровской) магнитной вязкостью, а требует увеличенной на много порядков турбулентной магнитной вязкости. Кроме того, быстрое затухание магнитного поля предполагает генерацию очень сильного, супер-Драйсеровского электрического поля, способного эффективно ускорять электроны, ответственные за микроволновое излучение.

Действительно, исследование карт полученных из тех же микроволновых данных, показывающих распределение плотностей тепловых и нетепловых электронов с высоким пространственным разрешением, позволило нам выделить и разрешить ту самую область вспышки, в которой происходит наиболее эффективное ускорение электронов. В этой области наблюдается очень высокая плотность нетепловых электронов, тогда как плотность тепловых электронов неизмеримо мала. Это означает, что практически все электроны, находившиеся в этой области, подверглись ускорению, благодаря процессу выделения магнитной энергии, наблюдаемому в форме быстрого затухания магнитного поля. Оценки энергетического баланса показывают, что зарегистрированная во вспышке убыль магнитной энергии достаточна для поддержания остальных форм энергии вспышки (нетепловой, тепловой, кинетической). Мы обсуждаем важность сделанных измерений и оценок для понимания механизмов, лежащих в основе солнечных вспышек в целом и, в частности, процессов ускорения заряженных частиц.

1. Fleishman G.D., Gary D.E., Chen B., Kuroda N., Yu S., Nita G.M. // Science 2020. In press.

PARTICLE DYNAMICS IN MERCURY'S MAGNETOSPHERE: A BRIEF OVERVIEW BEFORE BEPICOLOMBO

Dominique Delcourt

*CNRS - Universite d'Orleans - CNES 3A avenue de la Recherche Scientifique 45071 Orleans
Cedex 2 – France, dominique.delcourt@cnrs-orleans.fr*

In this talk, I will review some aspects of the solar wind interaction with the miniature magnetosphere of Mercury. In this magnetosphere, MESSENGER observations have revealed a variety of structural and dynamical features similar to those at Earth such as e.g. dayside cusps at high latitudes and a nightside magnetotail due to the weak (northward shifted) intrinsic magnetic field of the planet, or global topological reconfigurations with frequent reconnection events in the frontside and tail regions as well as short-lived dipolarizations. Still, the characteristic spatial and temporal scales of these events are here much smaller than those occurring at Earth. I will discuss some features of plasma transport and acceleration in this miniature magnetosphere of Mercury, starting from solar wind entry in the cusp and subsequent transport in the plasma mantle and plasma sheet, then addressing circulation of planetary material and its energization due to convection or impulsive electric fields, followed by magnetospheric escape or precipitation onto the planet surface. The common knowledge of Mercury's magnetized environment that has been acquired from MESSENGER datasets and theoretical/numerical studies will be considerably expanded with the forthcoming observations of the extensive plasma payload onboard the BepiColombo mission that was launched on October 20, 2018 and that will reach Mercury in December 2025.

ИССЛЕДОВАНИЯ ГРАНИЦЫ ГЕЛИОСФЕРЫ: СИТУАЦИЯ ПОСЛЕ ВЫХОДА ВОЯДЖЕРОВ В МЕЖЗВЕЗДНУЮ СРЕДУ

Измоленов В.В.

МГУ имени М.В. Ломоносова, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, izmod@iki.rssi.ru

Структура границы гелиосферы определяется взаимодействием солнечного ветра с локальной межзвездной средой. Несмотря на то, что первые модели этого взаимодействия были предложены в 60-70-х годах прошлого века Паркером, Барановым и др., до самого последнего времени экспериментальная информация о границе гелиосфере и о параметрах околосолнечной межзвездной среды имела лишь косвенный характер и была основана либо на анализе данных измерений параметров солнечного ветра, возмущенных из-за взаимодействия с межзвездной средой, либо на интерпретации измерений межзвездных атомов водорода и их производных — захваченных ионов и энергичных нейтральных атомов (ЭНА) гелиосферного происхождения.

В августе 2012 г. космический аппарат (КА) Вояджер-1 пересек гелиопаузу — тонкую структуру, которая отделяет плазму солнечного ветра от межзвездной сред, и впервые в истории человечества провел первые прямые измерения в межзвездной среде. В ноябре 2018 года в межзвездную среду вышел КА Вояджер-2. Первые данные, полученные на КА Вояджер в межзвездной среде, стали доступны, а результаты их анализа были опубликованы лишь в ноябре 2019 г. [1, 2]. Важно подчеркнуть, что в отличие от Вояджер-1 на КА Вояджер-2 работает прибор, измеряющий параметры протонной тепловой компоненты [2].

В докладе будет дан обзор данных о границе гелиосферы, имеющихся на настоящее время. Особое внимание будет уделено данным, полученным на Вояджерах в межзвездной среде, а также сравнению этих данных с результатами трехмерной численной модели границы гелиосферы [3].

1. Burlaga, L. F., Ness, N. F., Berdichevsky, D.B., 2019, Nature Astronomy, V. 3, 1007.
2. Richardson, J.-D., Belcher, J.-W., Garcia-Galindo, P., et al. 2019, Nature Astronomy, V. 3, 1019.
3. Izmodenov V. V., Alexashov D. B., A&A Let., 2020, doi: [10.1051/0004-6361/201937058](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937058)

Оперативная оценка геоэффективности солнечного ветра (РС индекс)

О.А.Трошичев

Арктический и Антарктический НИИ, С.Петербург, Россия
olegtro@aari.ru

Мониторинг «космической погоды» обычно осуществляется по данным измерений параметров солнечного ветра на спутнике ACE, находящемся в точке Лагранжа L1, на удалении ~ 1.5 млн. км от земной магнитосферы (<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>). Затем эти параметры редуцируются к земной магнитопаузе в предположении, что солнечный ветер, зафиксированный в точке Лагранжа, всегда контактирует с магнитосферой. Эта концепция была проверена в недавней работе [Vokhmyanin et al., 2019] при сравнении параметров солнечного ветра, измеренных в точке Лагранжа (данные OMNI), и перед фронтом ударной волны на спутнике Geotail, для тех редких интервалов времени, когда Geotail находился перед дневной магнитопаузой. Как оказалось, параметры солнечного ветра в точке Лагранжа не соответствовали параметрам солнечного ветра вблизи магнитосферы в 25% событий. Аналогичный вывод был сделан ранее [.] при анализе соотношений между индексом магнитной активности PC и межпланетным электрическим полем E_{KL} (рассчитанным по данным OMNI) в ходе магнитных суббурь.

Поведение PC индекса (который является показателем поступающей в магнитосферу энергии солнечного ветра [Резолюция XXII Ассамблеи МАГА, 2013]) обычно строго следует изменениям межпланетного электрического поля E_{KL} . Однако, связь между E_{KL} и PC иногда нарушается. Чтобы выявить частоту таких нарушений были рассмотрены соотношения между E_{KL} и PC в ходе магнитных суббурь, развитие которых определялось ростом предшествующего PC индекса. Результаты анализа суббурь за 2 цикла солнечной активности (1998 – 2017гг) показали, что корреляция между полем E_{KL} и PC отсутствовала в $\sim 20\%$ событий. Этот факт свидетельствует о том, что в рассмотренных случаях солнечный ветер, зафиксированный в точке Лагранжа, вообще не контактировал с магнитосферой. Таким образом, оперативная и достоверная оценка геоэффективности солнечного ветра, воздействующего на магнитосферу (и соответственно состояния магнитосферы), может осуществляться на основании PC индекса, который рассчитывается в режиме реального времени по данным магнитных измерений на околополюсных станциях Восток (Антарктика) и Туле (Гренландия). Учитывая это обстоятельство Международная организация по стандартам (ISO) рассматривает в настоящее время возможность использования PC индекса в качестве калибровочного стандарта для оценки мощности различных проявлений магнитосферного возмущения.

NONLINEAR THEORY AND NUMERICAL SIMULATIONS OF MEAN-FIELD α^2 DYNAMO IN CONTEXT OF SOLAR AND STELLAR ACTIVITY.

N. Kleeorin, N. Safiullin, I. Rogachevskii and S. Porshnev

BGU of the Negev, Beer-Sheva, Israel, nat@bgu.ac.il

В докладе обсуждается нелинейное турбулентное динамо среднего магнитного поля в контексте теории солнечной и звёздной активности. В рамках модели длины пути перемешивания для звёзд главной последовательности поздних спектральных классов (от F0 до M5) обсуждаются основные источники генерации среднего магнитного поля α и Ω –эффекты, а также турбулентная диффузия среднего магнитного поля [1,2]. В качестве основного нелинейного механизма, стабилизирующего динамо рассматривается влияние на генерацию магнитной части α эффекта [3], поведение которой, описывается специальным эволюционным уравнением [4]. Кроме того, учитывается и алгебраическое подавление генерации среднего магнитного поля [5]. В качестве главного механизма формирования звёздных пятен рассматривается эффект неустойчивости отрицательного магнитного давления среднего магнитного поля [6]. Рассматриваются основные схемы генерации магнитного поля $\alpha\Omega$, α^2 и $\alpha^2\Omega$, их важность в контексте солнечной и звёздной активности. Показано, чистое α^2 динамо требует для своего действия вращение в несколько раз больше солнечного. Однако, оно объясняет свойства активности звёзд холоднее, чем M2.

1. Parker E., 1955 – Astrophys.J. V.122 P.293.
2. Steenbek M, Krause P, Radler K.-H., 1966 - Z.Naturforsch. Bd.2Ia, S.369
3. Pouquet A., Frisch U., and Leorat J., 1976 - J. Fluid Mech. V.7, P. 321
4. Клиорин Н.И. и Рузмайкин А.А., 1982 – Магнитная гидродинамика № 2, С.17
5. Ирошников Р.С. - Астроном. журнал, 1963 т.40, вып.4, С. 742
6. Клиорин Н.И., Рогачевский И.В. и Рузмайкин А.А. Письма в Астрон. Журнал, 1989 Т.15 С.274

ЦИКЛИЧЕСКИЕ ВАРИАЦИИ КВАДРУПОЛЬНОЙ КОМПОНЕНТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

А.С. Шибалова, В.Н. Обридко, Д.Д. Соколов, Б.Д. Шельтинг, И.М. Лившиц

ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

as.shibalova@physics.msu.ru

Магнитное поле Солнца можно условно разделить на крупномасштабную и мелкомасштабную составляющие. Большинство основных явлений солнечной активности связывают с эволюцией локальных магнитных полей. Она приводит к формированию солнечных пятен и активных областей в целом – образований размером несколько угловых минут. Крупномасштабное поле включает в себя две высокоширотные области, занятые противоположно направленными полями, и набор квазиуниполярных структур на средних и низких широтах.

Известно, что при очень низкой активности магнитное поле в короне с определенной степенью точности представляет собой глобальный диполь, ось которого практически совпадает с осью вращения Солнца. С ростом активности влияние активных областей возрастает, и линия раздела полярностей крупномасштабных магнитных полей вблизи экватора становится волнистой. Кроме того, в этот период возрастает роль квадрупольной составляющей крупномасштабных магнитных полей и более высоких гармоник.

Для анализа связи полей разных масштабов с характеристиками солнечной активности используется вариация различных мультиполей, преимущественно низкой степени – диполь и квадруполь.

В настоящей работе проводился совместный анализ эволюции основной нечетной гармоники (диполя, рассмотрены две составляющие, аксиальный и экваториальный диполь), и основной четной (квадруполь). Показано, что эти 3 главных составляющих крупномасштабного поля ведут себя различно и не являются проявлениями одного и того же процесса.

1. Обридко В.Н., Шельтинг Б.Д. // Письма в АЖ, 2016, т. 42, №9, с. 694–700
2. DeRosa, M.L., Brun, A.S., Hoeksema, J.T. // The Astrophysical Journal, 2012, 757-796
3. Wang, Y.M., Sheeley, N.R. // Astrophys. 1992, J. 392, 310
4. Berdugina, S.V., Moss, D., Sokolov, D.D., Usoskin, I.G. // Astron. and Astrophys. 2006, 445, 703

Влияние восстановленной части ряда чисел Вольфа на период цикла Гляйсберга

Шибает А. И.

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

Устойчивый интерес к длиннопериодным циклам солнечной активности, в том числе к циклу Гляйсберга, связан с влиянием максимумов и минимумов солнечной активности на повседневную жизнь. В работе В. Гляйсберга[1] выделена периодичность около 80 лет амплитуд солнечной активности на промежутке с 1750 по 1955 год. Позже ряд исследователей получали оценки периодичности амплитуд циклов в диапазоне: 80 — 100 лет. Некоторые из них выделяют конкретное значение амплитуды равное 88 годам [2]. Ряд чисел Вольфа, на который Гляйсберг опирался, включал в себя 16 циклов, половина из них относится к восстановленной части ряда, правдоподобность которой вызывает сомнения. В данной работе исследуется зависимость периода огибающей амплитуд циклов от длины ряда. Показано, что с увеличением количества достоверных циклов, существенно возрастает и период огибающей амплитуд. Полученная в работе неустойчивость(растущая) периода огибающей кривой затрудняет экстраполяцию ее на внешний временной интервал.

1. Gleissberg W., // Publ. Istanbul Univ. 1955. Obs. **57**.
2. Feynman J., Stephen B., Gabriel, // Solar Physics. 1990. V. **127**(2). P. 393–403.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ И НАПРЯЖЕННОСТЬ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА РАЗНЫХ ДЛИТЕЛЬНЫХ ВРЕМЕННЫХ ШКАЛАХ.

Наговицын Ю.А., Осипова А.А.

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

IDV-индекс геомагнитной активности многими исследователями используется как прокси напряженности B межпланетного магнитного поля (ММП). В работе с помощью оригинального метода мультимасштабных регрессий, основанного на вейвлет-преобразовании, первоначально получен продолжительный ряд B , начиная с 1845 г. Затем, используя этот ряд как опорный, на основе новых версий 2.0 чисел пятен и их групп с помощью того же метода реконструирован ряд напряженности ММП, начиная с 1610 г. Дальнейшее продление рядов реконструкций было основано на радиоуглеродной реконструкции солнечной активности на временах до нескольких тысячелетий. Показано, что напряженность ММП испытывает в последние 3200 лет тренд на убывание -0.4 nT в тысячелетие.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 19-02-00088.

О ВЕРОЯТНОЙ СМЕНЕ СТАТУСА ТЕКУЩЕГО НЕОРДИНАРНОГО СБОЯ 11-ЛЕТНЕЙ ЦИКЛИЧНОСТИ СОЛНЦА С ЛОКАЛЬНОГО НА ... ГЛОБАЛЬНЫЙ

Козлов В.И.

Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера, СО РАН,
г. Якутск, cosmoprognoz@mail.ru

Обнаруженный по космическим лучам переходный колебательный процесс инверсии магнитного поля Солнца позволил выявить обратную зависимость длительности процесса инверсии поля от амплитуды солнечного цикла. Полученная зависимость положена в основу гипотезы об *Инварианте* бинарной связи характеристик 11-летнего цикла: «амплитуда - длительность», который описывает вариации амплитуды и длительности солнечного цикла в пределах *постоянства* площади (энергоемкости) его «фазового портрета» на комплексной фазовой плоскости. В случае нарушения консервативности, т.е. не сохранения площади «фазового портрета» 11-летнего цикла, можно утверждать о сохранении консервативности в широком смысле, когда площадь сохраняется для пары соседних циклов, что эквивалентно гипотезе об ИНВАРИАНТЕ 22-летнего цикла. **Увеличение** площади (энергоемкости) «фазового портрета» солнечного цикла 23 явилось *предвестником сбоя* 11-летней цикличности: в соответствии с инвариантом 22-летнего цикла, вслед за увеличением площади 23 цикла последовало *уменьшение* площади (энергоемкости) следующего, текущего 24 цикла.

Существование инварианта 22-летнего цикла позволяет с *единых* позиций описывать как локальные, так и глобальные сбои 11-летней цикличности, т.е. дать *физическую* классификацию аритмии в активности Солнца. На основе чего дан предварительный прогноз восстановления 11-летней цикличности в 25 цикле (2021-2030 гг.). И это должно быть известно уже к середине «20-х» (начало 2025 г. – своеобразная «*точка бифуркации*») годов следующего десятилетия. В этом случае, текущий неординарный сбой 11-летней цикличности в 23-24 циклах будет иметь статус *локального сбоя*, как это уже имело место в 19-20 циклах.

В случае нарушения инварианта 22-летнего цикла, произойдет смена статуса неординарного сбоя в 23-24-25 циклах на ... **глобальный**. Причем, это должно быть известно уже в начале 2025 г. И, как следствие этого – весьма вероятно дальнейшее *снижение* относительной вариации светимости Солнца, *срыв* режима автоколебаний в конвективной зоне («фазовая катастрофа», по Г.В. Куклину, 1982 г.), со всеми вытекающими отсюда последствиями. В частности: регистрации экстремального многолетнего *повышения* радиационного фона ГКЛ в течение ВСЕГО 25 цикла и, соответственно – *повышения* облачности и последующей *интенсификации* конвективных процессов в атмосфере, сопровождающейся *увеличением* количества осадков и *понижением* температуры в планетарном масштабе.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ В ФАЗЕ МИНИМУМА ТЕКУЩЕГО ЦИКЛА: ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА МИНИМУМА

Ишков В.Н.

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

Одиннадцатый год развития текущего 24 солнечного цикла, самого низкого по числу солнечных пятен эры космических исследований открыло новую страницу в исследованиях солнечной активности (СА). Изучение достоверного ряда солнечных пятен (с 1849 г.) показало, что циклы СА - 11-летние регулярные изменения СА от минимума к максимуму, подчиняются довольно жёсткому сценарию, который выражается в чередовании эпох повышенной и пониженной СА, разделённых переходными периодами. Малая статистика достоверного ряда относительных чисел солнечных пятен, позволяет увидеть общую картину сценария СА, но пока не может прояснить частные вопросы развития отдельных циклов, как 11-летних, так и физического магнитного (22-летних).

Новые наблюдательные данные расширяют возможности исследования вопросов по развитию отдельных фаз солнечных циклов в разные эпохи СА. Современный этап развития текущего 24 цикла СА – глубокая фаза минимума – даёт возможность с новых позиций рассмотреть вопросы связанные с поведением солнечных циклов около точки минимума. Под фазой минимума здесь понимается интервал времени, когда сглаженные значения относительных чисел солнечных пятен остаются в пределах $W^* \leq 30$. Фаза минимума, таким образом, является общей для предыдущего и последующего солнечного цикла.

По традиции точкой минимума называют месяц с наименьшим среднемесячным сглаженным числом Вольфа, после которого этот параметр неуклонно возрастает. Надо отметить, что другие индексы СА достигают минимума с разбросом в несколько месяцев. Так минимум индекса потока радио излучения на длине волны 10.7 см (2800 МГц) в 22 цикле совпал с основным минимумом, а в 23 – наступил на два месяца раньше.

Возможным важным отличием данного периода текущего солнечного цикла от других подобных периодов является, тот факт, что начиная с ноября 2019 г. практически все вновь появляющиеся короткоживущие группы пятен (одно-, двух-дневки) являются структурами следующего 25 цикла СА, хотя относительное число солнечных пятен продолжает падать.

Последние исследования циклов СА показали, что темп спада в фазах минимума отдельных солнечных циклах достоверного ряда относительных чисел пятен зависит от эпохи СА и высоты соответствующих солнечных циклов. Для определения момента минимума цикла важно знать темп спада появления пятен и количество беспятенных дней между их появлениями. С апреля 2016 г. текущий 24 цикл, открывший вторую эпоху пониженной СА, вступил в последний период своего развития, фазу минимума. Опыт исследования затянутых циклов (12, 13, 14) первого такого периода, 20 (эпоха пониженной СА) и 23 (переходного) циклов даёт возможность отнести вероятную границу наступления минимума текущего солнечного цикла на март 2020 г. с возможностью продления до начала 2021 г., но тогда текущий солнечный цикл выходит на новые показатели, которые требуют дальнейшего изучения.

ПРОЯВЛЕНИЯ N-S-АСИММЕТРИИ НА МАСШТАБАХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В 23-М И 24-М ЦИКЛАХ

Жукова А.В.¹, Соколов Д.Д.², Абраменко В.И.¹, Хлыстова А.И.³

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

²МГУ имени М.В.Ломоносова, г.Москва, Россия, sokoloff.dd@gmail.com

³ИСЗФ СО РАН, г.Иркутск, Россия, hlystova@mail.iszf.irk.ru

Данные инструментов HMI/SDO и MDI/SOHO позволили получить статистику 3777 активных областей (АО), появившихся на видимой стороне солнечного диска в период с 21.05.1996 по 31.12.2018. Использовалась методика непрерывной последовательности неперекрывающихся «портретов» Солнца (наблюдения трижды за солнечный оборот в пределах 60° от центрального меридиана).

Согласно предложенной нами ранее магнито-морфологической классификации (ММК) [1] и в соответствии со свойствами групп солнечных пятен [2] АО распределены по следующим категориям:

А – регулярные биполярные области, подчиняющиеся закону Хейла и закону Джоя, с лидирующим пятном, преобладающим по площади над основным хвостовым пятном;

В – биполярные области с нарушением хотя бы одной из указанных закономерностей;

U – одиночные пятна.

В-области были разбиты, в свою очередь, на меньшие подмножества в соответствии с нарушением вышеуказанных закономерностей. При установлении категории для каждой АО принималась во внимание ее эволюция, использовались изображения в белом свете и в линиях УФ, учитывалось наличие петельных связей между пятнами различной полярности.

На широтно-временных зависимостях для АО с нарушением закона Джоя и АО с нарушением соотношения между площадью лидирующего и хвостового пятен наблюдается увеличение относительного их количества по мере развития цикла. Это может свидетельствовать о подавлении среднего альфа-эффекта при прохождении динамо-волны. Для АО с указанными нарушениями обнаружены проявления N-S-асимметрии, что согласуется с предыдущими исследованиями зеркальной асимметрии солнечных магнитных полей [3]. Преобладание АО-нарушителей в южном полушарии может быть связано с ослаблением тороидального поля солнечного диполя за счет квадрупольной составляющей, благодаря чему становится заметным действие флуктуационного динамо. Циклические изменения числа регулярных АО и АО-нарушителей для 24-го цикла сходны с характером временных зависимостей для простых и сложных АО [4], распределенных в соответствии с особенностями магнитной конфигурации согласно классификации Маунт-Вилсон. Однако распределение АО в соответствии с ММК позволило выявить эффекты N-S-асимметрии не только в 24-м, но и в более сильном, 23-м цикле. Обнаружено, что в обоих циклах характер временных зависимостей для АО с нарушениями разных закономерностей носит индивидуальный характер и отличается как от временных зависимостей для регулярных АО, так и друг от друга.

Работа поддержана РНФ (проект 18-12-00131).

1. Zhukova A.V., Abramenko V.I., Kutsenko A.S. // AApTr 2019. V. **31**. P. 75.

2. van Driel-Gesztelyi L. & Green L.M. // Liv. Rev. in Solar Phys. 2015. V. **12**. P. 1.

3. Sokoloff D.D. et al. // Solar Phys. 2008. V. **248**. P. 17.

4. Nikbakhsh S. et al. // Astron. & Astrophys. 2019. V. **629**. P. 45.

ПЯТЕННАЯ АКТИВНОСТЬ И КОРОНАЛЬНЫЕ ДЫРЫ НА СПАДЕ 24 ЦИКЛА

Андреева О. А., Малащук В. М.

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

Во второй половине 24 цикла наблюдались 2 ярко выраженных интервала северо-южной асимметрии, выявленной по числу солнечных пятен (Sp). По данным сайта Королевской Бельгийской обсерватории <http://sidc.oma.be/silso/monthlyhemisphericplot> с апреля 2014 года по январь 2016 года доминировало южное (S) полушарие. После чего ситуация изменилась и, до конца исследуемого нами периода, пятенная активность преобладала в северном (N) полушарии. Целью данной работы было проанализировать: что происходит на Солнце с корональными дырами (CH) в этот период. Имеются ли различия по площадям, занятым CH в разных полушариях; выявить особенности поведения полярных и средне- и низкоширотных CH в этой фазе цикла.

В нашем исследовании мы использовали данные наблюдений, полученные инструментом SDO/AIA в линии железа (Fe XII 19.3нм), с апреля 2014 по декабрь 2019 гг. Для локализации CH и определения их площадей мы воспользовались базой Гелиофизических событий (HEK) (http://www.lmsal.com/hek/hek_isolsearch.html). Инструментом для извлечения информации о CH, послужил комплекс процедур SPoCA-Spatia Possibilistic Clustering Algorithm. Благодаря этим базам данных был получен массив площадей CH за период 1.04.2014-31.12.2019гг. Для анализа материала использованы такие характеристики солнечной активности, как ежедневные суммарные числа солнечных пятен Sp для N и S полусфер <http://sidc.oma.be/silso/datafiles#hemi>. Результаты расчетов представлены на Рис. 1 и Рис. 2.

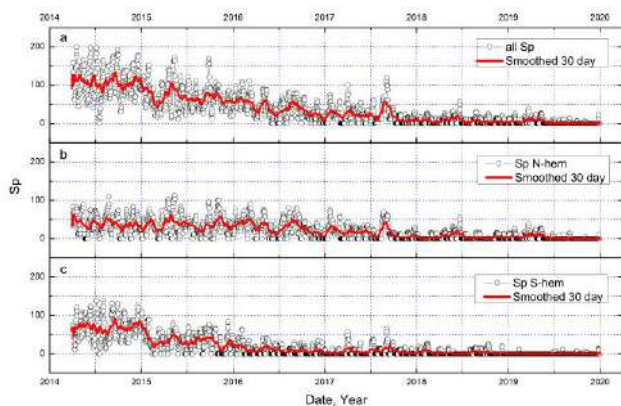


Рис. 1

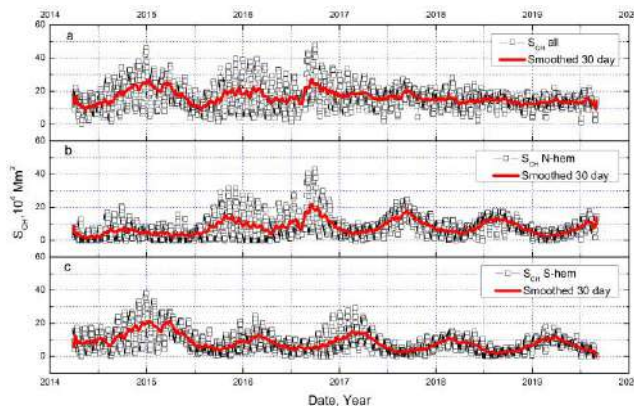


Рис. 2

Рисунки 1 и 2 демонстрируют изменения: пятенной активности, определенной по числу Sp, и ежедневных суммарных площадей CH, соответственно. На панелях (a) приведены данные для всей видимой поверхности диска Солнца, на панелях (b,c) – отдельно для N и S полусфер. Сплошной линией на обоих рисунках показаны сглаженные за месяц соответствующие величины.

Сравнительный анализ вариаций чисел Sp (Рис.1) и вариаций площадей CH (Рис.2) показал: спад солнечной активности к концу исследуемого периода сопровождается не только уменьшением чисел Sp, но и сокращением ежедневных суммарных площадей, занятых CH. Изменение площадей CH, имеет квази-асинхронный характер. С периодом в ~ 0.5 года одно из полушарий становится доминирующим по площадям CH. Полярные CH в данной фазе цикла вносят более ощутимый вклад в процессы изменения солнечной активности, чем средне- и низкоширотные CH. Именно они являются индикатором квази-асинхронного изменения площадей CH по полусферам.

МАГНИТНАЯ СВЯЗЬ ПОЛУШАРИЙ В ЭКСТРЕМУМАХ СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Файнштейн В.Г.¹, Загайнова Ю.С.², Обридко В.Н.²

1 – Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2 Москва, Троицк, ИЗМИРАН
E-mail: vfain@iszf.irk.ru

Изучены особенности магнитной связи солнечных полушарий. Для этого исследованы вариации со временем компонент магнитного поля на экваторе в период с 1976 по 2016 г.г. Компоненты поля находились из расчетов поля в потенциальном приближении с поверхностью источника на расстоянии $2.5R_s$ (R_s – радиус Солнца) на высоте $1.1 R_s$. При построении графиков использовались среднемесячные значения, сглаженные по стандарту 12-месячным окном. Оказалось, что усредненная таким образом радиальная компонента поля B_r показывает колебательные изменения с плохо выраженной 11-летней повторяемостью, азимутальная компонента $B_\phi \approx 0$ практически в течение всего времени анализа данных, а меридиональная компонента B_θ характеризуется периодическими изменениями с довольно отчетливым проявлением 11-ти летнего цикла. Обнаружено, что экстремумы кривой $B_\theta(t)$ совпадают с прохождением зависимости полярного поля через ноль, то есть с моментами переполюсовки полярного поля. В этот момент глобальное поле резко уменьшается и, значит, эти экстремумы преимущественно связаны именно с силовыми линиями локальных магнитных полей. Установлено, что знак B_θ совпадает со знаком силовых линий, соединяющих головные пятна. Это значит, что соединение через экватор в основном определяется головными пятнами. И, наконец, показано, что знак экстремумов B_θ противоположен знаку предстоящего экстремума полярного поля. Это означает, что полярное поле действительно генерируется хвостовыми пятнами групп пятен. Для выяснения деталей магнитной связи активных областей (АО), расположенных в разных полушариях, мы отобрали пары АО, расположенных в разных полушариях напротив друг друга вблизи центрального меридиана и недалеко от экватора. Для таких АО мы построили силовые линии, выходящие из различных точек этих АО. Все отобранные в пары АО оказались магнитно-связанными пучками силовых линий, выходящих в большинстве случаев из головной полярности АО.

ПАРАМЕТРЫ ИСТОЧНИКА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЦА В ЭПОХУ МИНИМУМА

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

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

Наблюдаемая нерадиальность полярных перьев К-короны Солнца может быть интерпретирована как проявление действия подфотосферного магнитного «заряда». В эпохи низкой солнечной активности этот «заряд» должен быть определяющим в формировании магнитного полярного поля Солнца. С целью проверки указанных предположений были проведены модельные расчеты конфигурации полярного магнитного поля. Полученные расчеты сравнивались с данными магнитных измерений обсерватории Kitt Peak. В результате сравнения было установлено, что в минимумах 1986 г. и 1996 г. полярное поле может быть аппроксимировано действием магнитного «заряда», смещенного на 0.66 радиусов Солнца от его центра. А в минимуме 2008 г. обнаружилось несоответствие между ориентацией силовых линий и широтной вариацией напряженности магнитного поля. Такое несоответствие означает, что источник полярного магнитного поля обладает свойствами, отличными от простого «заряда». Отличие магнитных свойств этого источника от свойств источников предыдущих минимумов указывает на то, что с конца 23 солнечного цикла изменились условия генерации магнитного поля Солнца.

БИПОЛИ, НАРУШАЮЩИЕ ЗАКОНЫ ДЖОЯ И ХЕЙЛА В 15-24-Х ЦИКЛАХ АКТИВНОСТИ

Тлатов А.Г., Тлатова К.А.

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

Используя данные оцифровки магнитных полей солнечных пятен за период 1917-2018 гг. были выделены биполи активных областей. Мы выполнили анализ углов наклонов биполей в 15-24-х циклов активности. Особое внимание было уделено биполям нарушающим закон Джоя (aJoy), а именно биполям хвостовые части, которых отклонены к экватору, а не к полюсам. А также биполи, нарушающие закон Хейла о ведущей и хвостовой полярности (aHale). Относительное количество биполей, имеющих полярность “aJoy” для разных циклов меняется слабо и составляет ~30%. Относительное число биполей “aHale” меняется от цикла к циклу ~12-20% от общего числа. Между амплитудой цикла активности и процентом биполей “aHale” существует существенная корреляция. Мы проверили, вызвана ли эта связь переналожением циклов активности на низких и высоких широтах. Для этого подсчитали относительное число биполей во временном интервале от момента максимума $T_{max} \pm 2$ года. Результат не изменился, и коэффициент корреляции остался высоким $R \sim 0.81$.

Мы также выполнили анализ углов наклона биполей в зависимости от их размера. Было подтверждено, что группы пятен площадью 100-200 мдп наиболее хорошо соответствуют закону Джоя. Для групп малой площади $S < 10$ мдп и большой площади $S > 1000$ мдп, углы уменьшаются.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-02-00098, и Программой ОФН РАН 12.

THE MEAN TILT OF SUNSPOT BIPOLAR REGIONS: THEORY, SIMULATIONS AND COMPARISON WITH OBSERVATIONS

K. Kuzanyan¹, N. Kleeorin², N. Safiullin³, I. Rogachevskii², A. Tlatov⁴, S. Porshnev³

¹IZMIRAN, Moscow Russia, kuzanyan@izmiran.ru

²Ben Gurion University, Beer-Sheva, Israel nat@bgu.ac.il

³Boris Eltsyn Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia n.t.safiullin@urfu.ru

⁴Kislovodsk Mountain Astronomical Station, GAO RAN, St. Petersburg, Russia tlatov@mail.ru

A theory of the mean tilt of sunspot bipolar regions (the angle between a line connecting the leading and following sunspots and the solar equator) is developed. A mechanism of formation of the mean tilt is related to the effect of Coriolis force on meso-scale motions of super-granular convection and large-scale meridional circulation. The balance between the Coriolis force and the Lorentz force (the magnetic tension) determines a contribution of the large-scale magnetic field to the mean tilt of the sunspot bipolar regions at low latitudes. In addition, the latitudinal dependence of the solar differential rotation affects the mean tilt which can explain deviations from the simplest Joy's law for the sunspot bipolar regions at high latitudes. The obtained theoretical results and performed numerical simulations based on the nonlinear mean-field dynamo theory which takes into account conservation of the total magnetic helicity are in agreement with observational data of the mean tilt of sunspot bipolar regions over individual solar cycles 15 - 24.

1. Tlatova K., Tlatov A., Pevtsov, A., Mursula, K., Vasileva, V., Heikkinen, E., et al., *Solar Phys.*, **293**, 118 (2018)

2. Kuzanyan, K.M., Safiullin, N., Kleeorin, N., Rogachevskii, I., Porshnev, S. "Large-Scale Properties of the Tilt of Sunspot Groups and Joy's Law Near the Solar Equator" *Astrophysics* // vol. 62, Iss. 2, pp. 261-275 (JUN 2019)

3. <https://arxiv.org/abs/2001.01932/>

ВКЛАД БОЛЬШИХ ДОЛГОЖИВУЩИХ ГРУПП ПЯТЕН В СОЛНЕЧНУЮ АКТИВНОСТЬ

Фүфаев В. В., Шаповал А. Б.

НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, fufaevvv@yandex.ru

При изучении солнечной активности важную роль играют солнечные пятна – визуально наблюдаемые области выхода в фотосферу сильных магнитных полей. При вращении Солнца некоторые группы пятен проходят через солнечный лимб и становятся невидимыми с Земли. В результате время их жизни оказывается неизвестным. Долгоживущие пятна вновь появляются в диапазоне видимости после соответствующего промежутка времени. Однако в каталогах групп солнечных пятен такие группы получают разные идентификационные номера. С другой стороны, описание солнечной активности во многом опирается на свойства именно долгоживущих пятен. Целью нашей работы является идентификация долгоживущих пятен методами машинного обучения и исследование вклада выделенных долгоживущих пятен в солнечную активность.

Предложен алгоритм, на основании которого долгоживущие пятна идентифицируются вероятностным образом. Для того, чтобы отождествить две группы пятен, первая должна содержать запись в области, отделенной от границы наблюдаемой области, а вторая группа должна содержать запись со сдвинутыми на соответствующий период координатами и временем. Разработанный алгоритм применялся к каталогу Гринвичской королевской обсерватории (The Royal Greenwich Observatory, RGO), который содержит записи с мая 1874 года по декабрь 2016.

Мы ввели новый индекс солнечной активности, определённый как ежедневная площадь долгоживущих пятен, осредненная в 11-летнем окне. Этот индекс демонстрирует высокую корреляцию со стандартным индексом R_G , который представляет площадь всех групп солнечных пятен за день, также осреднённую по одиннадцати годам.

Мы установили нетривиальные свойства двух компонент введённого индекса, которые описывают большие (максимальная площадь > 750 м.д.п.) и умеренные (от 500 до 750) долгоживущие пятна, обозначенные R_L и R_M соответственно. Для умеренных долгоживущих пятен функция, полученная нормировкой стандартным индексом, $r_M = R_M / R_G$, почти не меняется в 1915-2005 годах: квази-постоянное поведение наблюдается в 1915-1945 и 1980-2005 годах, тогда как медленные осцилляции с малой амплитудой имели место в 1945-1980 годах.

Мы показали, что нормированные большие долгоживущие пятна, $r_L = R_L / R_G$, по-прежнему коррелируют с R_G , внося непропорционально большой вклад в солнечную активность в целом. Однако при степенной нормировке $r_L^\gamma = R_L / R_G^\gamma$, $\gamma \approx 1.4$, получившийся ряд демонстрировал квази-константную динамику в 1915-1970 и 1980-2000 годах.

О СУПЕРВСПЫШКАХ НА СОЛНЦЕ И ЗВЁЗДАХ

Кацова М.М. (1), Обридко В.Н. (2), Соколов Д.Д. (3, 2), Лившиц И.М. (1, 2)

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

(2) ИЗМИРАН им. Н.В.Пушкова

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

Обсуждаются современные наблюдательные данные о наиболее мощных нестационарных явлениях на звёздах, подобных Солнцу. Оставаясь в рамках даже самых экстремальных солнечных представлений, не удаётся получить энергию вспышки больше, чем 10^{34} эрг, что, по-видимому, является абсолютным верхним пределом для Солнца.

Для получения в супервспышках на звёздах энергии 10^{36} эрг необходимо допустить, что поле в несколько тысяч Гс занимает площадь более 30% площади полусферы. Это дает среднее поле около 1кГс, что на звёздах солнечного типа не наблюдается. Более того, для этого необходимо сильно менять механизмы конвекции и динамо с соответствующим изменением моделей атмосферы. Рассматриваются возможные пути решения проблемы энергетики супервспышек.

Результаты получены при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 19-02-00191_a и 18-52-06002 Az_a.

ОЦЕНКА ВСПЫШЕЧНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ЭТАПЕ ВСПЛЫТИЯ

Куценко А.С., Куценко О.К., Абраменко В.И.

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

Специалистами в области физики Солнца по всему миру прикладываются большие усилия для построения надежного прогноза солнечных вспышек, которые, в том числе, определяют космическую погоду. Такой прогноз чаще всего основан на статистических исследованиях вспышечной продуктивности и различных параметров или характеристик активных областей, в которых и происходят солнечные вспышки. Такими параметрами могут быть морфология активной области, полный магнитный поток, ток вдоль линии раздела полярности, степень изгиба линии раздела полярностей, градиенты магнитного поля и другие (см., например, [1]). Исходными данными для расчета параметров или определения пространственной структуры активных областей часто служат наблюдения Солнца в различных спектральных линиях и магнитограммы.

Для анализа большого количества информации при построении прогноза в последнее время также повсеместно применяют современные методы машинного обучения, которые анализируют множество параметров и их изменения во времени перед вспышкой (например, [2]).

В данной работе мы предлагаем для построения прогноза вспышечной продуктивности анализировать наклон спектра мощности магнитного поля активных областей. В работе [3] более показано, что эта величина хорошо коррелирует со вспышечным индексом активной области. При этом, что является особенно важным при прогнозе, наклон спектра мощности чаще всего резко увеличивается на самых ранних этапах всплытия и остается практически постоянным до момента распада активной области. В этом преимущество использования наклона спектра мощности для прогноза: любой другой параметр становится возможным рассчитать только к моменту достижения активной областью максимума развития, т.е. на последних этапах всплытия.

Цель данной работы – провести статистический анализ изменения наклона спектра мощности всплывающих активных областей и установить, насколько достоверно можно оценить их вспышечную продуктивность на ранних этапах всплытия.

Результаты показывают, что для большинства активных областей увеличение наклона спектра мощности происходит в течение первых суток после появления на поверхности Солнца первых признаков всплывающего магнитного потока, тогда как весь процесс всплытия может продолжаться в течение нескольких дней. В то же время, наклон спектра мощности может существенно меняться в процессе всплытия.

Результаты работы могут использоваться для построения заблаговременного прогноза вспышечной продуктивности активных областей.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским научным фондом, проект № 19-72-00027.

1. Barnes, G.; Leka, K. D.; Schrijver, C. J. et al., 2016, The Astrophysical Journal, 829, article id. 89
2. Jonas, E., Bobra, M.; Shankar, V., Todd Hoeksema, J.; Recht, B., 2018, Solar Physics, 293, article id. 48
3. Abramenko, V.I., 2005b, The Astrophysical Journal, 629, 1141

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ФОТОСФЕРНЫХ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА И ЕЕ СВЯЗИ СО ВСПЫШКАМИ

Зимовец И.В.¹, Нечаева А.Б.^{1,2}, Шарыкин И.Н.¹, Chen F.³, Gan W.Q.⁴

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ivanzim@iki.rssi.ru

²МФТИ, г. Долгопрудный, Россия; ³NJU, Nanjing, China; ⁴PMO CAS, Nanjing, China

В активных областях (АО) Солнца текут электрические токи. Информация о распределении плотности токов важна для понимания процессов энерговыделения на поверхности Солнца и в вышележащих слоях. В докладе представлен анализ функции плотности вероятности (PDF) абсолютного значения плотности фотосферных вертикальных электрических токов ($|j_z|$) в 48 АО с 2010 по 2015 гг. в моменты времени до и после вспышки. Вычисление $|j_z|$ выполнено посредством применения дифференциальной формы теоремы о циркуляции магнитного поля (закона Ампера) к фотосферным векторным магнитограммам, полученным по данным наблюдений инструмента Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту космического аппарата Solar Dynamics Observatory (SDO). Показано, что для исследованных АО PDF($|j_z|$), в первом приближении, может быть аппроксимирована функцией Гаусса в области низких значений ($|j_z| < (10.1 \pm 1.3) \times 10^3$ статампер/см²) и спадающей степенной функцией в области более высоких значений. Также PDF($|j_z|$) некоторых АО может быть описана специфической каппа-функцией. Методом наименьших квадратов для всех АО получены параметры аппроксимирующих функций, построены их распределения, посчитаны математические ожидания и среднеквадратические отклонения. В частности, абсолютные значения показателя степенной функции и каппа-функции 3.69 ± 0.51 и 3.99 ± 0.51 соответственно. Систематических изменений параметров за время вспышки не обнаружено. Явной связи параметров с классом вспышки, а также с магнитным классом Хэйла пока не найдено. Для уточнения этого результата необходимо исследовать PDF($|j_z|$) в локальных вспышечных областях, занимающих малую долю площади полной АО. Приведены аргументы в пользу гипотезы, что распределение гаусса в области низких значений представляет шум в данных, тогда как степенной “хвост” отражает характер процессов генерации токов в АО Солнца.

Дополнительно представлены предварительные результаты анализа PDF($|j_z|$) для модельной АО со вспышками, рассчитанной численно с помощью кодов радиационной магнитной гидродинамики MURaM [1,2]. Показано, что PDF($|j_z|$) модельной АО имеют схожую форму с PDF($|j_z|$) реальных АО и в первом приближении могут быть описаны гауссианой в области низких значений и спадающей степенной функцией в области высоких значений. Однако наблюдается укрупнение PDF($|j_z|$) для модельной АО при экстремальных значениях $|j_z| > (2-3) \times 10^4$ статампер/см². Также как и для реальных АО, для модельной АО не обнаружено явных изменений PDF($|j_z|$) за время вспышки. Отдельно рассматривается PDF($|j_z|$) для локальной вспышечной области.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-72-20134).

1. Rempel M. // *Astrophys J.* 2017, 834:10 (23pp).
2. Chen F., et al. // *Astrophys. J.* (in preparation)

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ АТМОСФЕРЫ НАД АКТИВНЫМИ ОБЛАСТЯМИ ПО МУЛЬТИИНСТРУМЕНТАЛЬНЫМ МНОГОЧАСТОТНЫМ РАДИОНАБЛЮДЕНИЯМ

Ступишин А.Г., Кальтман Т.И., Лукичева М.А., Богод В.М., Яснoв Л.В.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, agstup@yandex.ru

В докладе представлен новый итерационный метод реконструкции параметров атмосферы (в первую очередь высотного профиля температуры) в верхней части переходной области и в нижней короне по многочастотным радионаблюдениям, в частности на РАТАН-600. Метод развивает идею, представленную в [1].

Метод предполагает, что магнитное поле известно; мы используем магнитное поле, реконструированное на основании наблюдаемого фотосферного поля в предположении нелинейного бессилового приближения (реализация алгоритма реконструкции представлена в [2]). Метод основан на детальном учете вклада каждого элементарного объема атмосферы над активной областью в общий поток радиоизлучения (рассматривалось тормозное излучение и излучение на 1-й – 4-й гармониках гирочастоты). На основании модельных расчетов показана применимость, эффективность и устойчивость метода к ошибкам наблюдений. Применение метода к наблюдаемым активным областям показывает хорошее соответствие современным представлениям о физических условиях над активной областью (высота переходной области 1 – 2 Мм, температура и электронная концентрация в нижней короне 2 – 2.5 МК и $1 - 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$ соответственно).

Рассмотрены возможные обобщения, в частности, применимость к наблюдениям на инструментах, дающих двухмерное изображение (таких, как Сибирский радиогелиограф). Проанализирована возможность использования наблюдений в других диапазонах (в частности, суб-терагерцовых наблюдений на инструменте ALMA) в качестве дополнительных условий метода. Рассмотрена возможная применимость результатов реконструкции параметров атмосферы к моделированию различных процессов в активных областях: вспышек, плазменных струй и др.

Работа поддержана грантами РФФИ 18-32-20165 и 18-29-21016.

1. A.G. Stupishin, T.I. Kaltman, V.M. Bogod, and L.V. Yasnov. 2018, Solar Phys., 293:13.
2. G.D. Fleishman, S. Anfinogentov, M. Loukitcheva, I. Mysh'yakov, and A. Stupishin. 2017, Astrophys. J., 839:30.

ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУИ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ

**Кальтман Т.И.¹, Накаряков В.М.^{1,2}, Анфиногентов С.А.³,
Ступишин А.Г.⁴, Лукичева М. В.^{1,5}, Шендрик А.В.¹**

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия, arles@mail.ru

²Centre for Fusion, Space and Astrophysics, Physics Department, University of Warwick, UK

³Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

⁴Санкт-Петербургский Государственный университет, С.-Петербург, Россия

⁵Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen, 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. На основе Каталога горячих струй в короне Солнца <http://spbf.sao.ru/coronal-jets-catalog> в докладе представлены наблюдения плазменных струй в активных областях в различных диапазонах. Рентгеновские и EUV наблюдения регистрируют коллимированные лучеобразные структуры. Представлена визуализация динамики по данным AIA в разных спектральных линиях. Для некоторых событий, совпадающих по времени с наблюдениями наземных инструментов РАТАН-600, СРГ и Nobeyama RadioHeliograph, представлены соответствующие данные микроволнового диапазона. Данные НМИ используются для реконструкции магнитного поля в нижнюю корону и сопоставляются с данными РАТАН-600 и СРГ. Дискутируются наблюдательные параметры радиоизлучения в событиях, связанных с плазменными струями, в зависимости от механизма образования, условий излучения и эволюции струй.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-29-21016.

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ СПОКОЙНЫХ СОЛНЕЧНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

Анфиногентов С.А., Накаряков В.М.

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

Постоянное присутствие в солнечной короне недавно обнаруженных незатухающих изгибных колебаний корональных плазменных петель с малой амплитудой позволяет проводить диагностику короны методами МГД-сейсмологии на регулярной основе. В отличие от традиционного подхода, основанного на анализе затухающих колебаний с большой амплитудой, вызванных вспышками и другими эруптивными процессами в активных областях, незатухающие колебания наблюдаются в том числе и на спокойной стадии развития активных областей и, поэтому могут обеспечить диагностику до того, как в активной области произойдет вспышка или корональный выброс масс, что необходимо для прогнозирования этих явлений.

Мы проанализировали незатухающие изгибные колебания в нескольких контрастных петлях, принадлежащих активной области NOAA 12107 и наблюдавшихся на западном лимбе Солнца 10 июля 2014 года инструментом AIA на борту орбитальной обсерватории SDO в канале 171 Å. Периоды колебаний оценивались с использованием метода усиления движения (motion magnification). Длина колеблющихся петель определялась в предположении их полукруглой формы путем измерения положения оснований. Контраст плотности в петлях оценивался по наблюдаемому контрасту интенсивности с учетом неизвестного пространственного масштаба фоновой плазмы. Комбинация этих измерений позволяет нам определять пространственное распределение изгибной и альвеновских скоростей в активной области. Таким образом, мы демонстрируем возможность диагностики короны активных областей методами МГД-сейсмологии на спокойной стадии их развития. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-72-00144.

ПЛАЗМА КОРОНЫ СОЛНЦА КАК АКТИВНАЯ СРЕДА ДЛЯ МАГНИТОЗВУКОВЫХ ВОЛН

Накаряков В.М.^{1,2}, Колотков Д.Ю.^{2,3}, Завершинский Д.И.^{4,5}

¹СПбФ САО РАН, г. Санкт Петербург, Россия, V.Nakariakov@warwick.ac.uk

²University of Warwick, Coventry, UK

³Институт солнечно-земной физики, СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁴Самарской Национальный Исследовательский Институт, г. Самара, Россия

⁵Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, г. Самара, Россия

Баланс между потерями тепловой энергии за счет излучения и теплопроводности и нагревом, осуществляемым неизвестным до сих пор механизмом, приводит к существованию в короне Солнца долгоживущих плазменных структур, таких как плазменные петли. Магнитозвуковые волны, возмущающие термодинамические параметры плазмы, а также величину магнитного поля, приводят к тепловому дисбалансу, который, в свою очередь, влияет на энергетику волн. Таким образом, плазма короны Солнца должна рассматриваться как активная среда, что необходимо учитывать при интерпретации наблюдений диссипации и усиления магнитозвуковых волн. Возможны как автоволновые, так и существенно диссипативные режимы [1].

В приближении бесконечного магнитного поля выведено дисперсионное уравнение, описывающее медленные магнитозвуковые волны в случае сильной неадиабатичности. Процессы нагрева моделируются степенными зависимостями от термодинамических параметров плазмы. Найдено, что дисперсионное уравнение содержит два временных масштаба, определяемых специфической формой радиационных потерь и нагрева. Динамика волн зависит от отношения этих временных масштабов и периода колебаний. Наличие внутренних временных масштабов приводит к появлению волновой дисперсии, особенно ярко выраженной в автоволновых, незатухающих режимах. Одним из проявлений волновой дисперсии является эволюция широкополосного возмущения в квазипериодический цуг магнитозвуковых волн [2], с характерным периодом сравнимым с периодами квазипериодических пульсаций, наблюдаемых в солнечных вспышках.

В частности, учет активности плазмы может объяснить эффективное затухание и генерацию стоячих магнитозвуковых волн в плазменных петлях, известных как колебания типа "SUMER". Кроме того, установлено, что добротность колебаний типа "SUMER" зависит от их амплитуды в степени $1/3$, что указывает на необходимость учета нелинейных эффектов [3].

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 17-52-80064.

1. Kolotkov, D.Y., et al., Astron. Astrophys. 2019. V. 628, A133.
2. Zavershinskii, D. I., et al., Phys. Plasmas 2019. V. 26, 082113.
3. Nakariakov, V. M., et al., Astrophys. J. Lett. 2019. V. 874, L1.

Mg XII и нановспышки

Рева А.А., Ульянов А.С., Кириченко А.С., Богачев С.А., Кузин С.В.

ФИАН РАН, г. Москва, Россия, reva.antoine@gmail.com

Теория нагрева солнечной короны нановспышками предсказывает наличие постоянного излучения от высокотемпературной плазмы в неспышечных активных областях. Такое излучение сложно обнаружить с помощью немонахроматических телескопов (таких как AIA или XRT), потому что их изображения содержат фоновый сигнал от низкотемпературной плазмы. В этой работе мы ищем горячую плазму в неспышечных активных областях, используя данные спектрогелиографа Mg XII, работавшего на борту спутника КОРОНАС-Ф/СПИРИТ. Этот прибор получал монахроматические изображения солнечной короны в линии иона Mg XII 8.42 Å, которая излучает при температурах более чем 4 МК. Изображения Mg XII содержат сигнал только от горячей плазмы без низкотемпературного фона. Мы исследовали горячую плазму в активных областях по данным СПИРИТ с 18 по 28 февраля 2002 года. В этот период времени спектрогелиограф Mg XII непрерывно регистрировал изображения с интервалом в 105 секунд. Горячая плазма наблюдалась только в активных областях. В неспышечных активных областях горячая плазма на изображениях Mg XII отсутствовала. Мера эмиссии горячей плазмы в неспышечных областях не должна превосходить $3 \times 10^{24} \text{ см}^{-3}$. Горячая компонента дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) меньше чем 0.01 % от ДМЭ основной компоненты. Отсутствие излучения линии Mg XII 8.42 Å в неспышечных активных областях может быть объяснено слабыми и частыми нановспышками с интервалом между нановспышками менее чем 500 секунд.

ПРЯМЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В СОЛНЕЧНОЙ НАНОВСПЫШКЕ

Богачёв С.А., Ульянов А.С., Лобода И.П., Рева А.А., Кириченко А.С.

ФИАН, г. Москва, Россия, bogachev@lebedev.ru

Солнечные вспышки низких энергий (микро и нано вспышки) являются одним из вероятных источников энергии для нагрева солнечной короны. Механизм нановспышек предположительно связан с магнитным пересоединением, но надёжно не установлен из-за недостатка пространственного разрешения и низкого уровня сигнала. В данной статье мы приводим результаты исследования, которые проливают дополнительный свет на физику нановспышек и подтверждают идею, что их механизм может не отличаться от стандартной модели вспышки. Объектом нашего исследования была нановспышка от 25 февраля 2011 года (рисунок 1) для которой мы определили температуру плазмы, 3.1 МК, полную энергию, 6.2×10^{25} эрг и высоту над поверхностью Солнца, 1.5 тыс. км. В окрестности вспышки мы выделили 5 магнитных потоков и восстановили конфигурацию магнитного поля в короне в потенциальном и бессиловом приближениях. В короне Солнца было обнаружено 3 X-точки, две из которых совпали с областью наиболее интенсивного энерговыделения на изображениях AIA в каналах 171 Å, 131 Å и 193 Å. Во время вспышки магнитная топология области перестроилась таким же образом, как в стандартных солнечных вспышках. Мы нашли корреляцию между энерговыделением и всплыванием/опусканием одного магнитного потока и не нашли никакой корреляции со сдвиговыми движениями плазмы. Полная свободная энергия активной области была оценена как 8.9×10^{25} эрг. Это означает, что около 2/3 от этой энергии было передано в нагрев плазмы и ВУФ излучение. Остаток энергии мог быть передан в ускорение частиц и движения плазмы, но эти явления все ещё скрыты от прямого наблюдения для событий столь низкой интенсивности.

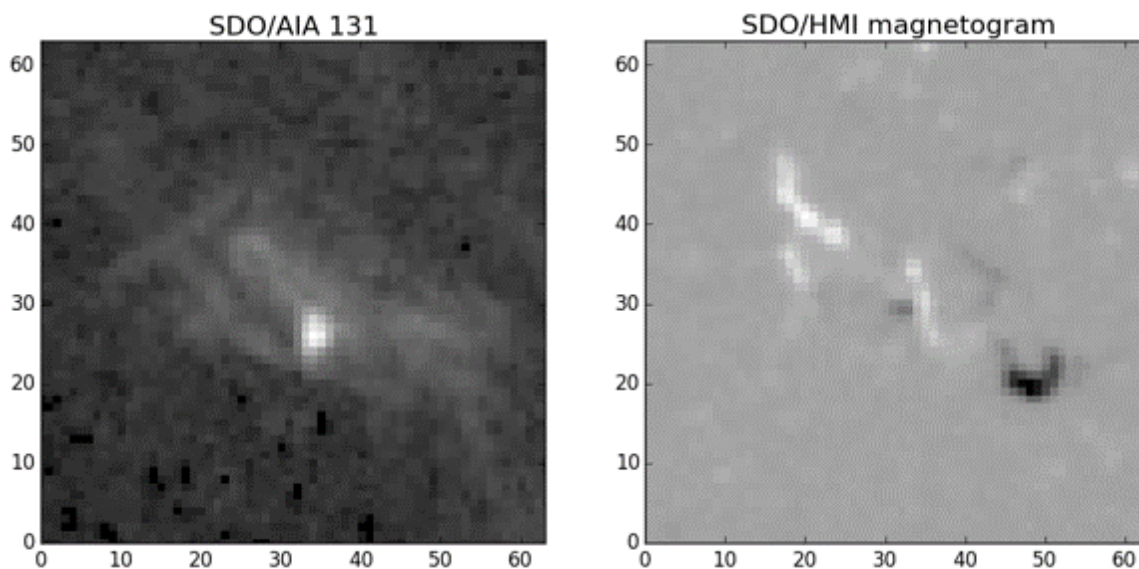


Рисунок 1. Одновременное изображение нановспышки в канале AIA 131 Å (слева) и структуры магнитного поля в области по данным HMI. По осям — пиксели AIA (0.6'' на пиксель).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 17-12-01567.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАЦИЙ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕНИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ДО И ПОСЛЕ НАЧАЛА В НИХ ЭРУПТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Загайнова Ю.С.¹, Файнштейн В.Г.²

1 – ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, yuliazagainova@mail.ru

2 – ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск

Для анализа нами были отобраны две группы событий, наблюдаемых в активных областях (АО) с солнечными пятнами: к 1-ой группе мы отнесли АО, в которых наблюдалось генерация быстрых КВМ (линейная проекционная скорость $V_{lin} > 1200$ км/с), ко 2-ой - медленных КВМ ($V_{lin} < 600$ км/с). Обязательным условием было наличие солнечной вспышки, сопровождающей генерацию каждого КВМ. В пределах тени каждого заметного пятна в АО исследовали особенности изменения со временем минимального α_{min} угла наклона силовых линий поля к радиальному из центра Солнца направлению. Мы анализировали поведение α_{min} за 3 часа до начала связанной с КВМ вспышки и спустя 3 часа после ее начала. Параметр α_{min} выбран нами для анализа, поскольку он отображает угол наклона оси магнитной трубки из тени пятна. Обнаружено, что в каждой АО, в которой возник быстрый КВМ, существуют пятна, в которых наблюдается заметное (в несколько раз) уменьшение α_{min} , либо сразу с момента начала солнечной вспышки, либо после ее начала. В остальных пятнах АО резких изменений α_{min} перед началом или с момента начала вспышки может не наблюдаться. Тренды в поведении α_{min} в тени остальных солнечных пятен в зависимости от времени могут быть, как положительными, так и отрицательными. В событиях с медленными КВМ резкие изменения этих углов наблюдаются редко. Еще одна особенность во время эруптивных событий – наличие колебаний поведения α_{min} с различными частотами. Для двух отобранных групп событий были построены и сопоставлены спектры мощности колебаний α_{min} . Пока не удалось установить единую причину обнаруженных особенностей поведения α_{min} , однако, такое поведение α_{min} можно рассматривать, как индикатор перестройки магнитной конфигурации АО перед мощными эруптивными событиями. Некоторые пятна, в которых наблюдались резкие изменения α_{min} , оказались магнитно-связанными с пятнами соседних АО, а некоторые из таких «особенных» пятен оказались вблизи линии раздела полярности фотосферного поля.

НАБЛЮДЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ВО ВРЕМЯ ПОЛНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЗАТМЕНИЙ

Филиппов Б.П.

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

Корональные выбросы вещества были обнаружены в начале 1970-х по наблюдениям с помощью орбитального коронографа на борту OSO-7. Вместе с тем, поскольку явление это не слишком редкое, они могли быть замечены гораздо раньше во время наблюдений полных солнечных затмений в белом свете. На некоторых зарисовках структуры короны, сделанных еще в XIX веке можно различить образования, которые сейчас, несомненно, были бы отождествлены как корональные выбросы. К сожалению, движение этих структур не могло быть замечено за короткое время полной фазы затмения в одной точке наблюдения из-за ограниченных возможностей регистрирующей аппаратуры. При наличии качественных наблюдений в различных местах, далеко разнесенных вдоль полосы лунной тени, движение выброса в короне могло бы быть зафиксировано, но таких сообщений не было. Развитие регистрирующей техники и методов цифровой обработки изображений позволили получить прекрасные примеры корональных выбросов на затменных снимках солнечной короны. Во время затмения 21 августа 2017 г., которое называли "великим американским затмением", поскольку полоса лунной тени пересекала всю территорию США, были проведены прекрасные наблюдения, позволившие различить движение очень слабого выброса в короне по снимкам, полученным из одной точки наблюдений в интервале около 2-х минут. Будут показаны эти результаты в сопоставлении с данными наблюдений короны космическими инструментами.

ЯРКИЕ КОМПАКТНЫЕ СТРУКТУРЫ В ЭРУПТИВНОМ ПРОТУБЕРАНЦЕ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В МИКРОВОЛНОВОМ И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ИЗЛУЧЕНИЯХ

Мельников В.Ф.¹, **Хуанг Дж.**², **Тан Б.Л.**²

¹ ГАО РАН, г. С.-Петербург, Россия, v.melnikov@gaoran.ru

² НАОС, г.Пекин, Китай

На основе данных Радиогелиографа Нобеляма и КУФ телескопа AIA/SDO выявлены новые свойства микроволнового излучения эруптивного протуберанца, наблюдавшегося 9 мая 2015 г. Эруптивный протуберанец представлял собой расширяющийся скрученный жгут в форме петли. Показано, что распределение яркости микроволнового и КУФ излучения вдоль петлеобразного жгута сильно фрагментировано с характерным пространственным масштабом $< 10\text{-}20$ угл.сек, причем яркость каждого фрагмента флуктуирует с характерным временем 3-5 сек. Обнаруженные свойства интерпретированы как следствие процессов мелкомасштабных и кратковременных энерговыделений внутри скрученного магнитного жгута.

ВЛИЯНИЕ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ НА ГЕНЕРАЦИЮ РАДИОВСПЛЕСКОВ II ТИПА

Биленко И.А.

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

Согласно современным представлениям, радиовсплески II типа (PB2) связаны с распространением ударных волн в солнечной короне и солнечном ветре. Считается, что PB2 являются следствием последовательности таких физических процессов как формирование ударной волны, ускорение электронов на фронте ударной волны, генерация плазменных волн с последующим преобразованием их в электромагнитные волны. Источниками ударных волн в солнечной короне являются вспышки и корональные выбросы массы (КВМ). Однако только небольшое число вспышек и КВМ сопровождается PB2. Ряд исследований показали, что собственно параметры вспышек и КВМ или их сочетание не являются определяющими факторами для генерации PB2, хотя КВМ сопровождающиеся и не сопровождающиеся PB2 отличаются как по таким параметрам как угол раствора, скорость, так и их распределением по диску Солнца и связи со вспышками. Однако большое число высокоскоростных, мощных КВМ не сопровождается PB2. Большинство PB2 наблюдаются при средних вспышках класса M, а многим PB2 соответствуют слабые вспышки класса C.

В данном исследовании изучалось влияние корональной среды на генерацию PB2. Рассмотрены зависимости параметров PB2 от величины магнитного поля, плотности плазмы, альфвеновской скорости, и их циклических вариаций в 23 и 24 циклах. Значения магнитного поля и плазмы рассчитаны для расстояний соответствующих высотам наблюдения PB2. Параметры PB2 практически не зависят от фазы цикла солнечной активности. На параметры КВМ, и связанных с ними PB2, большое влияние оказывает структура глобального магнитного поля (СГМП) Солнца. PB2 имеют тенденцию к формированию в периоды доминирования стабильных структур. Их число максимально при доминировании секторной СГМП. Показано, что магнитное поле и параметры корональной плазмы в циклах солнечной активности изменяются не плавно от минимума к максимуму, а регулируются циклическими изменениями СГМП. При понижении магнитного поля и альфвеновской скорости даже слабые, низкоскоростные КВМ, но со скоростью превышающей локальную альфвеновскую скорость могут сопровождаться PB2. При высокой альфвеновской скорости даже мощные, высокоскоростные КВМ, в максимумах циклов, но имеющие скорость ниже локальной альфвеновской, не сопровождаются PB2.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что параметры магнитного поля и плазмы являются важными факторами, определяющими условия в атмосфере Солнца, которые влияют на генерацию PB2.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МОДЕЛИ ЗЕБРА-СТРУКТУРЫ В ЯВЛЕНИИ 21 ИЮНЯ 2011 Г.

Чернов Г.П.¹, Яснов Л.В.²

¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия, gchernov@izmiran.ru

²Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия

Проведен анализ спектральных характеристик радиоизлучения всплеска от 21 июня 2011 г на основе усовершенствованной методики определения номеров гармоник для соответствующих полос зебра-структуры. По параметрам зебра-структуры в частотно-временном спектре на основе модели с двойным плазменным резонансом определены в области генерации всплеска магнитное поле и его динамика, электронная плотность, изменение со временем относительного к масштабу плотности по радиусу силовой трубки расстояния между полосами с номерами гармоник $s=55$ и 56 и соседними полосам вблизи частоты ≈ 183 МГц. Определены также соотношения масштабных характеристик поля и плотности вдоль и поперек оси силовой трубки и их зависимость от времени. Полученное поле (1.5 Гс для первой гармоники и 0.75 Гс для второй гармоники плазменной частоты) оказалось настолько малым, что, во-первых, не позволяет объяснить динамические особенности спектра на основе МГД волн, а во-вторых, приводит к значениям для плазменного бета большим 1. Отмечаются также и другие возможные трудности механизма генерации всплесков с ZP на основе ДПР. Модель с вистлерами на качественном уровне объясняет основные наблюдательные характеристики данной зебры. Необходимая величина магнитного поля в этом случае около 4.5 Гс, а плазменная бета - 0.14, что вполне отвечает корональным условиям.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №17-02-00308) и Проекта Минобрнауки КП19-270.

ПРЕДВЕСТНИКИ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Абрамов-Максимов В.Е.¹, Бакунина И.А.²

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, beam@gaoran.ru

²НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

По данным наблюдений на радиогелиографе Нобеляма исследованы квазипериодические колебания (КПК) микроволнового излучения нескольких активных областей (АО) перед вспышками. Во всех рассмотренных случаях перед вспышками наблюдается появление (или значительное усиление) флуктуационных процессов. Периоды КПК оказались в различных случаях разные: от 3-х до нескольких десятков минут. При этом длительность предвспышечных цугов колебаний в периодах колебаний во всех случаях оказалась примерно одинаковой и составляет в среднем 5 периодов.

Для события SOL2011-08-02T05:19 (вспышка M1.4 2 августа 2011 г. в АО NOAA 11261) установлено, что КПК проявлялись не во всей АО, а были локализованы в компактной области. Положение этой области не совпадает с наиболее яркими микроволновыми источниками и, по-видимому, приходится на межпятенную область.

Эффект усиления КПК перед вспышками может рассматриваться как прогностический фактор.

ДИНАМИКА ТОКОНЕСУЩИХ МАГНИТНЫХ ТРУБОК, ВЫЗВАННАЯ ИЗМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

¹ Степанов А.В., ²Зайцев В.В.

¹ГАО РАН, С-Петербург, Россия astep44@mail.ru; ²ИПФ РАН, Н.Новгород, Россия, zal30@appl.sci-nnov.ru

Исследована динамика вспыхивающих петель и волокон (flux ropes) при изменении протекающего в них электрического тока. Показано, что наблюдаемое сокращение размеров вспыхивающих петель (shrinkage) на импульсной фазе вспышки и последующий подъем петель связан с уменьшением и последующим усилением электрического тока. Причины изменения величины электрического тока в магнитных петлях объяснены на основе модели петли как эквивалентного RLC- контура и магнитной неустойчивости Рэлея-Тэйлора. Приведены примеры изменения геометрии токонесущих flux ropes.

ВАРИАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В ГЕЛИОСЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ M9.3 30 ИЮЛЯ 2011

Шарыкин И.Н., Зимовец И.В.

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

Работа посвящена исследованию динамики магнитного поля и вертикального электрического тока на фотосфере во время гелиосейсмически активной солнечной вспышки M9.3 GOES класса, произошедшей 30 июля 2011 г. Данное событие примечательно тем, что является одним из самых импульсных в 24 цикле солнечной активности, при этом оно сопровождалось мощными гелиосейсмическими возмущениями («солнцетрясениями»). В работе [1] было показано, что вспышки с фотосферными возмущениями являются наиболее импульсными (быстрыми) с точки зрения энерговыделения. Целью представленной работы является установление связи наблюдаемого импульсного вспышечного энерговыделения, сопровождавшегося фотосферными и гелиосейсмическими возмущениями, с быстротой изменения структуры фотосферного магнитного поля и вертикальных электрических токов. Для решения поставленной задачи проводится анализ недавно появившихся в открытом доступе (начиная с 2017 г.) 135-секундных векторных магнитограмм HMI/SDO, позволяющих проследить изменения магнитного поля на временных масштабах солнечной вспышки (в отличие от стандартных 720-секундных магнитограмм). Показано, что очень быстрые изменения пространственной структуры вектора магнитного поля и вертикального электрического тока на уровне фотосферы происходили во время солнечной вспышки на временных масштабах импульсной фазы (нескольких минут). Наблюдалось быстрое усиление горизонтальной компоненты поля в области размера 4x7 Мм около нейтральной линии (НЛ) магнитного поля. Также было зафиксировано быстрое усиление полного вертикального фотосферного электрического тока и рост горизонтального градиента вертикальной компоненты магнитного поля до величин более 1 кГс/Мм вблизи НЛ. Сопоставления карт магнитного поля с распределением фотосферных возмущений показало, что наиболее мощные возмущения генерируются в области наиболее сильных изменений магнитного поля вблизи НЛ.

[1] Sharykin I.N. & Kosovichev A.G. Sunquakes of 24th solar cycle // arXiv:1911.04197, 2019

SURFACE CURRENTS AND KINK INSTABILITY OF MAGNETIC FLUX ROPE IN THE SOLAR CORONA

Tsap Y.T., Stepanov A.V, Kopylova Y.G., Cheremnykh O.K., Fedun V.M., Krishtal A.N.

CrAO RAS, Nauchny, yur_crao@mail.ru

The stability of the isolated flux rope (external azimuthal component of the magnetic field is equal to zero) based on the energetic principle is considered. The expression for the potential energy perturbation in the long wave approximation was derived. It has been shown that the kink mode is always stable due to the surface current independently on the radial profile of the current density. Paradigms of neutralized and non-neutralized currents in the solar atmosphere are discussed.

This study was supported in part by the Russian Foundation for Basic Research, project № 18-02-00856 and the Basic Research Program of the Russian Academy of Sciences № 12 “Questions of the Origin and Evolution of the Universe.”

СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МОДЕЛЬНОЙ ВСПЫШЕЧНОЙ ХРОМОСФЕРЫ

Моргачев А.С., Цап Ю.Т., Моторина Г.Г., Смирнова В.В.

ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, a.s.morgachev@mail.ru

К настоящему времени получено много указаний, свидетельствующих об определяющем вкладе в суб-терагерцовое (0.1–1 ТГц) излучение с положительным наклоном спектра тепловой плазмы [1, 2, 3, 4]. Однако вопрос о природе источника излучения остается открытым. Решение данной проблемы позволяет получить ценную информацию о механизмах нагрева вспышечной плазмы. В данной работе выполнен расчет временной эволюции теплового тормозного излучения в суб-терагерцовом диапазоне для моделей вспышечной хромосферы и переходной области (<https://www.fchroma.org>), полученных на основе численного решения системы уравнений радиационной гидродинамики с помощью программного кода RADYN [5], описывающего отклик хромосферной плазмы на поток высокоэнергичных электронов в виде импульса треугольной формы. Получено, что в течение всего времени всплеска формируется положительный наклон спектра в интервале частот от 93 до 400 ГГц. Причем в некоторых моделях время максимума излучения суб-ТГц всплеска опережает максимум функции инжекции энергичных электронов. Значения спектральных потоков могут достигать 300 с.е.п. на частоте 400 ГГц при площади источника излучения $1.5 \times 10^{18} \text{ см}^2$. В зависимости от числа и показателя спектра высыпающихся ускоренных частиц временной профиль суб-ТГц излучения может быть довольно сложным и состоять из нескольких пиков.

1. Kontar E.P. et al. // Astron. Astrophys. 2018. V. **620**. id. A95. 6 p.
2. Morgachev A.S. et al. // Geomagnetism and Aeronomy 2018. V. **58**. Issue 8. P. 1113.
3. Trottet G. et al. // Solar Phys. 2011. V. **273**. Issue 2. P. 339.
4. Tsap Yu.T. et al. // Advances in Space Research 2016. V. **57** № 7. P. 1449.
5. Joel C.A., Kowalski A.F., Carlsson M. // Astrophys. J. V. **809**. P. 104.

Результаты тестирования одноканального макета НА «Солнце-Терагерц»

**Калинин Е.В., Филиппов М.В., Махмутов В.С., Стожков Ю.И., Квашнин А.А.,
Измайлов Г.Н., Озолин В.В.**

ФИАН, evgieneniy@bk.ru

В ряде солнечных вспышек, зарегистрированных в последние годы на радиочастотах от нескольких ГГц (10^9 Гц) до 400 ГГц, обнаружено наличие четкой 2-х компонентной структуры в частотном спектре излучения. Первая из них соответствует хорошо известному микроволновому спектру с максимумом потока на частотах несколько десятков ГГц, а 2-я компонента, не наблюдавшаяся ранее, отчетливо демонстрирует значительный рост потоков излучения с ростом частоты в области ~ 200 -400 ГГц и выше. Кроме того, в этом диапазоне обнаружены пульсации потоков радиоизлучения с характерными временами от нескольких минут до десятых долей секунды. Именно в этой области частот (свыше 100 ГГц) необходимы тщательные измерения пространственно - временных характеристик солнечного излучения вне земной атмосферы (на спутниках), где отсутствует поглощение этого излучения.

Целью проекта «Солнце-терагерц» является разработка научной аппаратуры для регистрации солнечного излучения в терагерцовом диапазоне. Разрабатываемый комплекс аппаратуры позволит изучить пространственно-временные свойства неисследованного ранее солнечного терагерцового излучения, как спокойного Солнца, так и его активных проявлений (солнечных вспышек, выбросов корональной массы, и т.д.), а также изучения физической природы процессов ускорения заряженных частиц в солнечных активных областях по радиоизлучению в диапазоне $10^{11} - 10^{12}$ Гц.

В рамках подготовки к третьему этапу «Изготовление макетов и опытных образцов НА, автономные испытания и корректировка рабочей документации», проведены эксперименты по детектированию и анализу терагерцового излучения от чернотельного теплового источника на разных частотах в диапазоне 0,4-10ТГц. Проанализирована зависимость получаемого с детектора сигнала в зависимости от температуры и давления. Представлены результаты измерения фона.

Тщательное измерение терагерцового излучения Солнца имеет, кроме научной составляющей, важное прикладное значение, в частности для прогнозирования мощных солнечных вспышек на Солнце и их возможного воздействия на межпланетное пространство, земную магнитосферу, на атмосферные процессы и на электронные космические системы, наземные энергетические установки и коммуникационные системы.

ЗАЛИМБОВЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ KONUS-WIND В 1994-2019 ГГ.

**Лысенко А.Л., Кашапова Л.К., Хадсон Х.С., Фредерикс Д.Д., Голенецкий С.В.,
Ридная А.В., Свинкин Д.С., Цветкова А.Е., Уланов М.В., Аптекарь Р.Л.**

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

Залимбовыми называются вспышки, основания петель которых скрыты за солнечным лимбом, а для наблюдателя с Земли видны источники излучения, находящиеся высоко в короне. Свойства подобных событий могут сильно отличаться от типичных параметров вспышек, произошедших на видимой части диска Солнца. Например, для жесткого рентгеновского излучения залимбовых вспышек характерны плавные временные профили, необычно низкие для гиротронного излучения пиковые частоты микроволнового спектра, а также слабый тепловой отклик, наблюдаемый в мягком рентгеновском диапазоне инструментами на околоземной орбите. Несомненно, залимбовые вспышки связаны с мощными процессами выделения энергии, не только позволяющими наземным наблюдателям фиксировать это загадочное явление, но и оказывающими значимое влияние на околоземную среду. Возможности наблюдать залимбовые вспышки появляются у земных наблюдателей достаточно редко, на данный момент в литературе описано около 10 таких событий, и это, в частности, затрудняет их исследование.

Эксперимент Konus-Wind проводит практически непрерывные наблюдения Солнца в жестком рентгеновском диапазоне (~20-1200 кэВ) с 1994 г. по настоящее время, что даёт хорошие возможности для ретроспективного поиска таких редких событий. Поскольку Konus-Wind не предоставляет пространственной информации, первичным критерием отбора кандидатов был низкий тепловой отклик, зарегистрированный инструментом GOES в мягком рентгеновском диапазоне, относительно значительного излучения ускоренных электронов, зарегистрированного инструментом Konus-Wind. Далее мы провели локализацию кандидатов при помощи различных инструментов, включая RHESSI, NoRH, OVSA, STEREO-A/B, NRH и т. д. и исключили вспышки, находившиеся на диске Солнца. В результате были найдены 20 залимбовых солнечных вспышек с положениями оснований петель от 8° до $\sim 40^{\circ}$ за лимбом, среди которых были как уже исследованные ранее вспышки, так и новые события. Мы представляем результаты исследования этой группы залимбовых вспышек в метровом радио, микроволновом и рентгеновском диапазонах, которые позволяют выявить общие свойства и закономерности характерные для этих событий, так и характерные особенности, различающиеся от вспышки к вспышке.

Работа поддержана грантом РФФИ 17-12-01378.

ЭНЕРГЕТИКА МОЩНЫХ ВСПЫШЕК X КЛАССА В МИНИМУМАХ 22, 23 И 24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ

Моторина Г.Г., Лысенко А.Л., Анфиногентов С.А., Флейшман Г.Д.

Главная (Пулковская) Астрономическая Обсерватория РАН, motorinagalina@gmail.com

Под солнечной активностью подразумевают совокупность явлений на Солнце, связанных с изменением конфигурации магнитного поля. Показателями солнечной активности принято считать международное число солнечных пятен (число Вольфа), а также поток радиоизлучения на длине волны 10.7 см, TSI (total solar irradiance, полное солнечное излучение), величину магнитного поля, частоту корональных выбросов массы, солнечных вспышек и др. Солнечная активность обладает цикличностью на различных временных шкалах от 158 дней до тысячелетий, но наиболее выражен одиннадцатилетний цикл активности. Хотя появление солнечных вспышек является в большой степени случайным, их число хорошо коррелирует с числом солнечных пятен и другими показателями активности, однако, отдельные активные области, производящие мощные вспышки, могут появляться на любой фазе цикла, включая минимумы. Появление таких активных областей и связанное с ним возникновение мощных вспышек рентгеновского X-класса наблюдалось на самом спаде 21, 22, 23 и 24 солнечных циклов. Возможно, вспышки X-класса сопровождали и минимумы предыдущих циклов, но для того времени классификация событий по рентгеновским классам инструментами серии GOES была не доступна.

В данной работе мы впервые рассматриваем мощные вспышки в минимумах активности как отдельную группу событий. Для этого мы отобрали три вспышки X-класса в минимумах 22 (вспышка 1996-07-09 класса X2.2), 23 (вспышка 2006-12-13 класса X3.4) и 24 (вспышка 2017-09-06 класса X9.3) солнечных циклов, которые хорошо наблюдались различными инструментами, для многоволнового анализа. Мы оцениваем их энергетику и распределение энергии магнитного поля между различными вспышечными компонентами, включая тепловую энергию плазмы, энергию ускоренных электронов и ионов, кинетическую энергию корональных выбросов массы, магнитную энергию и пр. Данная работа поддержана грантом РФФИ 18-32-00439 мол_а.

СОПОСТАВЛЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ РЕНТГЕНОВСКОГО И ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК 28 И 29 ОКТЯБРЯ 2003 ГОДА С ПРОЦЕССАМИ МАГНИТНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ.

Б.Ю.Юшков¹, В.Г.Курт¹, А.Верониг², Й.Черниц², Ю.Хинтеррайтер², В.И.Галкин³, Б.В.Сомов⁴

1 НИИЯФ МГУ, Россия, clef@srd.sinp.msu.ru; 2 Институт физики, Университет Граца, Австрия; 3 Физический ф-т МГУ, Россия; 4 ГАИШ МГУ, Россия

Ускорение заряженных частиц и нагрев плазмы во вспышке являются результатом выделения энергии, вызванного процессом магнитного пересоединения. Чтобы найти связь между этими процессами, мы исследовали импульсную фазу двух мощных вспышек 28 октября 2003 года и 29 октября 2003 года. Мы вычислили локальное электрическое поле E_c и «глобальную» скорость пересоединения магнитного поля $d\phi/dt$ из Na-фильтрограмм и карт магнитного поля. Процессы ускорения частиц высоких энергий во время этих вспышек исследовались на основе измерений КОРОНАС-Ф/СОНГ в диапазоне энергий 40 кэВ–200 МэВ. Эти данные были дополнены результатами измерений КОРОНАС-Ф/СПРН, INTEGRAL/SPI, RHESSI, TRACE и GOES. Основные результаты исследования таковы:

1). В обеих вспышках максимальные значения $d\phi/dt$, усредненные по обеим полярностям, составляли $(4.5 \pm 0.5) \times 10^{19}$ Мкс $\cdot$ с $^{-1}$.

2). Производная мягкого рентгеновского излучения dI_{SXR}/dt , которая рассматривается как «прокси» временного поведения энерговыделения вспышки, запаздывает по отношению к $d\phi/dt$ на ≈ 100 с 28 октября и на ≈ 140 с 29 октября. Этот результат подтверждает эффект, ранее обнаруженный в трех событиях. Проверка этого эффекта дополнительно на 15 эруптивных вспышках показала его реальность.

3). Максимальное значение напряженности электрического поля E_c во вспышке 28 октября 2003 г. было 90 В $\cdot$ см $^{-1}$, а 29 октября - 60 В $\cdot$ см $^{-1}$, в среднем за время вспышек значения E_c составляли ≥ 30 В $\cdot$ см $^{-1}$ в первой и < 30 В $\cdot$ см $^{-1}$ во второй вспышке. Мы считаем обнаруженную разницу в напряженности электрического поля значимой для различия в эффективности ускорения частиц. Все определяемые ускоренными электронами характеристики вспышек оказались различными: показатель γ степенного спектра тормозного излучения с энергиями > 100 кэВ 28 октября изменялся в пределах 1.8–2, 29 октября - 3.5–4.5. Отношение рентгеновского балла вспышки (X17 и X10) и максимального значения dI_{SXR}/dt равно 1.7; отношение потоков жесткого (> 40 кэВ) рентгена и мощности ускоренных электронов ~ 4 . Максимальный поток гамма-излучения от распада пионов 28 октября был равен 1.2×10^{-2} фот $\cdot$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1} \cdot$ МэВ $^{-1}$ на 100 МэВ, 29 октября - 3×10^{-4} фот $\cdot$ см $^{-2} \cdot$ с $^{-1} \cdot$ МэВ $^{-1}$, что показывает существенное различие в эффективности ускорения протонов до субрелятивистских энергий.

4). В обеих вспышках тормозное излучение и гамма-линии были зарегистрированы в самом начале импульсной фазы в момент, когда значение $d\phi/dt$ превысило $(7-8) \times 10^{18}$ Мкс $\cdot$ с $^{-1}$.

5). Время максимума $d\phi/dt$ рассматривается как начало кардинальной перестройки магнитного поля во время развития вспышки. Основным результатом данного исследования является то, что в обеих вспышках процесс ускорения протонов до энергий выше порога образования пионов (300 МэВ) начался после этого критического момента.

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ НА ПРИМЕРЕ СОБЫТИЯ 28.10.2003

Чариков Ю.Е., Опарин И.Д.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, y.charikov@yandex.ru

Континуум тормозного жёсткого рентгеновского (ЖР) излучения от мощных солнечных вспышек (класс X по классификации GOES и выше) может быть измерен и проанализирован для энергий квантов вплоть до единиц МэВ. Генерация тормозного излучения происходит в процессе рассеяния электронов, ускоренных в ходе солнечной вспышки, на ионах и электронах тепловой плазмы вспышечных петель [1]. Отметим, что существенный вклад в поток и направленность ЖР излучения в релятивистской области энергий ЖР излучения вносят электроны с энергиями $E > 511$ кэВ. Учёт анизотропии в их распределении влияет на характеристики ЖР излучения (поток, спектр, степень поляризации), необходимые при восстановлении параметров самих ускоренных электронов.

В работе исследовано влияние электрон-электронного тормозного излучения [2, 3] на спектры ЖР излучения для чрезвычайно мощной вспышки 28 октября 2003 (класс GOES X17.2) по данным спектрометра RHESSI и восстановлены параметры энергетического спектра излучающих электронов в модели толстой мишени. Аппроксимация проводилась в приближении одностепенного и двухстепенного законов с учётом и без учёта электрон-электронного ($e-e$) рассеяния. Восстановление энергетических спектров электронов без учёта $e-e$ рассеяния приводит к возникновению излома в высокоэнергичной области $E_{br} = 1481$ кэВ, показатель спектра до энергии излома $\delta_1 = 5,4$; выше энергии излома $\delta_2 = 2,2$. Учёт электрон-электронного рассеяния позволяет аппроксимировать спектр ЖРИ при помощи одностепенного закона для энергетического спектра электронов с показателем $\delta = 4,8$. Для двухстепенной модели аппроксимации получен спектр электронов со слабым изломом на энергии $E_{br} = 1446$ кэВ и показателями спектра $\delta_1 = 5,2$ и $\delta_2 = 4,0$.

Таким образом учёт $e-e$ рассеяния сглаживает излом энергетического спектра электронов, что вызвано преобладанием вклада ЖР излучения по электрон-электронному механизму над электрон-ионным при релятивистских энергиях электронов. Это является свидетельством того, что формирование одностепенного энергетического спектра электронов происходит в ходе одной стадии ускорения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИ 0040-2019-0025.

1. Kontar, E.P., Brown, J.C., Emslie, A.G. et al. // 2011, Space Sci Rev 159, p. 301
2. Haug, E. // 1975, Zeitschrift für Naturforschung, 30 a, p. 1099
3. Haug, E. // 1998, Sol. Phys., 178, 341

ПРОТОННЫЕ ВСПЫШКИ С ВЫРАЖЕННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗОЙ: СОЛНЕЧНЫЕ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЭЛЕКТРОНЫ И ПРОТОНЫ

Струминский А.Б., Григорьева И.Ю., Логачев Ю.И., Садовский А.М.

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

Под импульсной фазой обычно понимают время наблюдения жесткого рентгеновского (HXR) и микроволнового (μ -) излучения до максимума мягкого рентгеновского (SXR) излучения [1]. В работе [2-3] было выделено два типа длительных протонных вспышек – с выраженной и невыраженной импульсной фазой. Импульсная фаза ярко выражена в SXR, если наблюдается эффективное хромосферное испарение (время запаздывания максимума меры эмиссии относительно максимума температуры вспышечной плазмы составляет менее 10 мин), а в HXR и μ - излучениях, если в их временных профилях присутствуют всплески длительностью менее 3 минут. В предлагаемом докладе будут рассмотрены примеры вспышек с выраженной импульсной фазой и показано, что всплески нетеплового излучения в импульсной фазе не имеют прямого отношения к ускорению протонов.

В межпланетной среде возможно наблюдение только потоков релятивистских электронов, ускоренных в импульсной фазе. Ожидаемые потоки протонов в межпланетной среде, рассчитанные по максимумам μ -излучения [4] часто превышают наблюдаемые. Одновременный рост потоков релятивистских электронов и протонов >100 МэВ на орбите Земли с подобными временными профилями указывает на их длительное стохастическое ускорение после импульсной фазы, как предложено в [3].

1. Benz A. // Living Rev. Solar Phys. V. 2. Id. 2(59pp).
2. Струминский А.Б., Садовский А.М., Логачев Ю.И., Григорьева И.Ю.// Труды XXIII всероссийской ежегодной конференции «Солнечная и солнечно-земная физика-2019», ГАО РАН 2019. С. 377.
3. Chertok, I.M. // Geomagnetism and Aeronomy. 2018. V. 58. P.457.
4. Струминский А. Б., Григорьева И. Ю., Логачев Ю. И. и Садовский А. М. // *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ*. 2020. Т. 46. № 2. С. ??.

ДЛИТЕЛЬНАЯ СЛАБАЯ ВСПЫШКА C1.2 26 НОЯБРЯ 2011 ГОДА – ИСТОЧНИК СКЛ (ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ)?

Григорьева И.Ю., Струминский А.Б., Шаховская А.Н.

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

Обычно мощные солнечные вспышки, регистрируемые в мягком рентгеновском (SXR) диапазоне, являются источниками ускоренных частиц в межпланетном пространстве (МП), что, по-видимому, и отражает так называемый «синдром большой вспышки» [1]. Для объяснения длительной фазы спада SXR-излучения необходимо предположить продолжающееся развитие процессов ускорения электронов в атмосфере Солнца. Время первой регистрации и форма временных профилей солнечных протонов указывает на их длительный выход в МП на фазе спада при малой интенсивности SXR-излучения, то есть на их возможное ускорение одновременно с электронами. Следует отметить случай регистрации пионного гамма-излучения в C3.7-вспышке [2].

Поэтому для уточнения места и времени ускорения энергичных частиц, регистрируемых в МП, интересно исследовать протонные события, связанные со слабыми SXR-вспышками. В нашей работе рассматривается пример такого события – вспышка C1.2, произошедшая 26 ноября 2011 года в активной области с координатами N08W49. Из известных характеристик протонных событий отметим: 1) продолжительное SXR-излучение (GOES), 2) массивный гало KBM (SOHO_LASCO), 3) радиоизлучение (Wind/WAVES) III-типа на 25-180 МГц и прерывистый II-тип, распространяющийся далеко в МП. Однако, проявления на микроволнах (RSTN) и в жестком рентгене (RHESSI, ACS SPI) не превышали фона. Одновременный рост потоков релятивистских электронов (SOHO/EPHIN) и протонов (ACS SPI) с энергиями >100 МэВ с подобными временными профилями, указывает на длительное стохастическое ускорение их в короне [3].

[1] Kahler, S.W. // JGR. 1982. V. **87**. P. 3439.

[2] Share, G. H., Murphy, R. J., White, S. M., et al. // ApJ. 2018. V. **869**. P. 182.

[3] Струминский А. Б., Григорьева И. Ю., Логачев Ю. И., Садовский А. М. // Физика Плазмы. 2020. Т. **46**. №2, С ??.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ В EUV ПО ДАННЫМ SDO/EVE. ДЕКРЕМЕНТЫ В ЛИНИЯХ ВОДОРОДА И ГЕЛИЯ ВО ВСПЫШКАХ

Якунина Г.В., Бруевич Е.А.

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

Солнечные вспышки представляют собой взрывной процесс высвобождения большого количества энергии. Они демонстрируют изменения в структуре магнитных полей в активной области (АО) и процесс их перестройки. Для изучения вспышек желательны наблюдения с высоким временным разрешением (которое до эпохи SDO было недоступно в EUV) в широком спектральном диапазоне. Это позволяет анализировать потоки, формирующиеся одновременно как в ярких, так и слабосветящихся структурах вспышечной атмосферы. С момента запуска SDO в 2010 г. стали доступны для анализа наблюдения потоков в EUV-линиях с высоким пространственным и временным разрешением в 24-м цикле солнечной активности.

Наиболее длительные ряды потоков во вспышках (с 1978 г.) доступны из наблюдений в линиях рентгеновского излучения на спутниках серии GOES. Мы используем наблюдения GOES одновременно с данными из архива SDO во вспышках в EUV-линиях водорода, нейтрального и ионизованного гелия.

EUV- потоки меняются не только в исследуемых линиях в течение вспышки, а также изменяется их декременты (относительные потоки). Декременты в этих линиях и их вариации служат хорошими индикаторами параметров (температуры и плотности), изменяющейся излучающей среды.

Высокое временное разрешение позволило исследовать поведение Лаймановских декрементов в линиях водорода и гелия во время вспышек разных мощностей. Показано, что изменение декрементов во вспышках разной мощности происходит по-разному. Зависимость декрементов от времени, по-видимому, связана с временной эволюцией энерговыделения, что указывает не только на неоднородность излучающей среды, но и на переменность самих неоднородностей.

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЕ ПУЛЬСАЦИИ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ: КИНЕМАТИКА УСКОРЕНИЯ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Шабалин А.Н.¹, Чариков Ю.Е.¹, Глобина В.И.², Овчинникова Е.П.¹

¹Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург,
taoastronomer@gmail.com

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

Квазипериодические пульсации жесткого рентгеновского излучения либо отражают особенности вспышечного энерговыделения, либо модуляционное действие квазипериодических источников, таких как, например, осциллирующие магнитные петли. Периоды собственных мод МГД осцилляций петель соответствуют временному интервалу для квазипериодических пульсаций жесткого рентгеновского излучения. В работе рассматривается возможность интерпретации квазипериодической временной структуры потока жесткого рентгеновского излучения на масштабе 10-60с в диапазоне 30-150 кэВ, наблюдаемой в солнечных вспышках. За основу рассмотрения принята модель коллапсирующей ловушки, в которой в результате наложения эффектов бетатронного и Ферми ускорения происходит модуляция потока ускоренных электронов при их переносе в магнитной петле в процессе “коллапса”, приводящая к возникновению КПП жесткого рентгеновского излучения. Задача решалась численным интегрированием нестационарного релятивистского уравнения Фоккера-Планка для ускоренных электронов, в котором учитывались кулоновские потери и питч - угловая диффузия, влияние обратного тока, бетатронное ускорение и ускорение Ферми, рассеяние на магнитных флуктуациях. Показана возможность возникновения КПП рентгеновского излучения в данной модели при отсутствии турбулентности в магнитной петле и рассмотрено влияние данных процессов на временную структуру жесткого рентгеновского излучения вспышек для различных начальных популяций электронов - изотропных, анизотропных, с жестким и мягким энергетическими спектрами как без, так и в присутствии магнитных флуктуаций.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСПОЗНАВАНИЯ КПП С НЕСТАЦИОНАРНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Куприянова Е.Г.¹, Кальтман Т.И.², Брумол А.-М.³, Мехта Т.³

¹ ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru

² ЛФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

³ Университет Варвик, г. Ковентри, Великобритания

В настоящее время общепризнана роль квазипериодических пульсаций (КПП) излучения солнечных и звездных вспышек в диагностике вспышечных процессов. Очевидно, что результаты диагностики напрямую зависят от того, насколько правильно оценена статистическая значимость КПП и их параметры. Для распознавания и анализа КПП обычно применяются стандартные статистические методы: автокорреляционный анализ, периодограмма Фурье, вейвлет-анализ. В большинстве случаев применение таких методов оправдано, поскольку период большинства найденных КПП сохраняется почти постоянным. Однако в случае КПП с нестационарными, т. е. с заметно меняющимися во времени, параметрами применение стандартных методов приводит к ложным результатам. Одной из причин видимой нестационарности параметров КПП является суперпозицией нескольких периодических компонент (мультипериодические КПП). Суперпозиция КПП с близкими периодами приводит к эффекту биений, который проявляется таким образом, что на вейвлет спектре вместо двух полос, соответствующих двум периодам, видна одна прерывающаяся полоса [1]. Этот артефакт затрудняет определение истинных периодов КПП, а также локализацию КПП во времени. Метод разложения по эмпирическим модам (EMD), не имеющий базовых периодических функций, лучше подходит для анализа КПП с меняющимися параметрами [2]. Тем не менее, его эффективность в случае мультипериодических КПП с близкими периодами до сих пор не анализировалась.

В данной работе проведен предварительный анализ мультипериодических КПП, представляющих собой сумму двух периодических компонент с фазовым сдвигом. Предварительно протестированы четыре метода: периодограмма Фурье полного ряда, периодограмма Фурье ряда без тренда, вейвлет-преобразование, метод EMD. Тестирование проведено на основе синтетических временных рядов. Каждый временной ряд состоит из трех основных компонент: медленно меняющегося низкочастотного тренда, шума и КПП, состоящие из двух компонент с периодами $P_1 = 1/f_1$ и $P_2 = 1/f_2$ и с расстоянием между частотами $\Delta f = f_2 - f_1$. Большая выборка (600 временных рядов) формируется за счет вариаций параметров основных компонент и их всевозможных комбинаций. Цель работы заключается в том, чтобы проанализировать, КПП с насколько маленьким Δf могут быть разрешены как отдельные компоненты, и какой метод является наиболее чувствительным. Предварительное тестирование методов на синтетических временных рядах показало, Фурье-методы оказались чувствительнее методов EMD и вейвлет, разделяя компоненты на меньшем расстоянии Δf .

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-52-10001.

1. Kupriyanova E. G., Melnikov V. F., Shibasaki K. // Sol. Phys. 2013. V.284. P. 559
2. Broomhall A.-M. et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser. 2019. V. 244. P. 44.

О НАКЛОНЕ СПЕКТРА МИКРОВОЛНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НАД НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИЕЙ ФОТОСФЕРНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Абрамов-Максимов В.Е.¹, Опейкина Л.В.², Боровик В.Н.¹

¹ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, beam@gaoran.ru

²САО РАН, г. Нижний Архыз, Россия

Известно, что микроволновые источники, расположенные над нейтральной линией фотосферного магнитного поля, являются типичными для вспышечно-продуктивных активных областей. Для этих источников характерны высокие яркостные температуры, меньшая степень поляризации и больший наклон спектра по сравнению с источниками, расположенными над пятнами. В ряде работ, выполненным по данным наблюдений Солнца на РАТАН-600 в 1980-е годы, для всех источников, расположенных над нейтральной линией магнитного поля (пекулярных источников), были получены значения наклона спектра 7-9 (например, Korzhavin A.N., Gelfreikh G.B., Vatrushin S.M., 1989, In: Teplitskaya, R.B. (ed.) Solar Magnetic Fields and Corona, Proceedings of the XIII Consultation Meeting on Solar Physics, 26 September — 2 October, 1988, Odessa, 2, Nauka, Siberion Division, Novosibirsk, p.119). Однако в работах, выполненных в недавнее время (например, Abramov-Maximov V.E., Borovik V.N., Opeikina L.V. et al., 2015, Sol. Phys, vol.290, p.53; Bogod V.M., Kaltman T.I., Yasnov L.V., 2012, Astrophys. Bull., vol.67, p.425) для всех рассмотренных событий получены меньшие значения (3-5). Для выявления причин этого расхождения проведена повторная обработка рассмотренных в ранних работах событий.

СЕВЕРО-ЮЖНАЯ АСИММЕТРИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР ВО ВТОРОМ МАКСИМУМЕ 24 ЦИКЛА

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

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

По данным базы Гелиофизических событий (НЕК) [1] исследовались особенности поведения корональных дыр (СН) в период максимальной асимметрии 24 цикла (2014-2015.25 годы), определенной по показателю пятенной активности. Для обнаружения СН был использован метод, основанный на нечеткой кластеризации значений интенсивности (SPoCA) [2,3].

В период второго максимума 24 цикла в южном полушарии Солнца имело место квази-одновременное преобладание активности как по пятнам (по числу пятен и площадям), так и по общей площади, занятой СН. По нашему мнению, это говорит о том, что СН и пятна – это элементы общей магнитной активности. Обсуждаются взаимосвязи между полями в различных масштабах в процессе генерации цикла. Эти структуры ведут себя связанным образом на временных масштабах, на порядок меньших, чем солнечный цикл. Полоидальное поле, в виде открытых полей СН, и тороидальное поле, в виде активных областей, зависят друг от друга. Все это хорошо согласуется с выводами работы [4], где авторы так же отмечают, что эволюция СН и активных областей является частью единого процесса.

Идея асимметрии - важная составляющая теории динамо. В классическом подходе, когда речь идет об асимметрии говорят, о количестве пятен, их площади и т.д., но не о корональных дырах. Наш результат показывает, что асимметрия – это более глубокое явление, которое проявляется даже на таких крупных структурах, как открытые магнитные поля, и проявляется она не через 11 лет, а в режиме реального времени, по ходу цикла.

Полученный нами результат требует дальнейшего исследование такого рода асимметрии в других циклах, на более длительных промежутках времени, отдельного исследования полярных и низкоширотных СН для того, чтобы получить больше информации для теории динамо.

Данные SDO/AIA были предоставлены центром Joint Science Operation Centre (JSOC). Авторы выражают благодарность команде проекта Heliophysics Event Knowledgebase (НЕК) за возможность доступа к базам данных СН.

1. Hurlburt N., et al. // Sol. Phys. 2012. V. **275**. P. 67.
2. Verbeeck C., et al. // Sol. Phys., 2011, V. **67**, P. 283
3. Verbeeck C., et al. // A&A, 2014, **A29**, P.561
4. Obridko V.N., Shelting B.D. // Astronomy Reports 2013. V. **57**, No. 10. P. 848.

ДИАГНОСТИКА КОРОНАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАНЫМ НАБЛЮДЕНИЙ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИГРАФА

Анфиногентов С.А., Киселев В.И., Егоров Я.И., Мышьяков И.И., Кудрявцева А.В.,
Кочанов А.А.

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

Магнитное поле Солнца играет ключевую роль в солнечной активности. Поэтому информация о нем чрезвычайно важна для понимания и прогноза таких явлений как солнечные вспышки и корональные выбросы масс. На уровне фотосферы магнитное поле может быть измерено напрямую по эффекту Зеемана, а вот в короне такие измерения невозможны. В настоящее время, основной способ получения информации о магнитном поле в короне Солнца состоит в его реконструкции по фотосферным магнитограммам в приближении потенциального или бессилового поля. Однако такой подход имеет ряд ограничений и труднопреодолимых сложностей. И здесь огромное значение приобретают наблюдения в микроволновом диапазоне, которые дают нам единственный в настоящее время способ прямого измерения магнитного поля в короне Солнца.

В докладе представлены результаты картографирования абсолютного значения магнитного поля активных областей в переходной зоне хромосфера-корона по данным многоволновых наблюдений, выполненных на Сибирском Радиогелиографе (СРГ) на 32 частотах в диапазоне 4-8 ГГц. Величина магнитного поля оценивается по наклону линейного участка спектра микроволнового излучения. Кроме того, обсуждается более сложный метод измерения магнитного поля путем подгонки параметров одномерной модели солнечной атмосферы, наилучшим образом соответствующих наблюдаемому микроволновому спектру. Работоспособность методик была проверена на синтетических радиокартах, построенных на основе реалистичной модели солнечной активной области с помощью пакета GX-simulator, и свернутых с инструментальной функцией СРГ. Достоверность, спектральных измерений СРГ подтверждена сравнением с наблюдениями РАТАН-600. Таким образом, благодаря регулярным многоволновым наблюдениям Солнца, выполняющимся на СРГ, стала возможной регулярная радиомагнитография солнечных активных областей с двухмерным пространственным разрешением.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-32-20165 мол_a_вед.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СРАВНЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ СОЛНЦА НА РАЗНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ

Ахтемов З.С., Ханейчук В.И., Цап Ю.Т.

КрАО РАН, п. Научный, Крым, Россия, azis@craocrimea.ru

Проведен анализ расчета коэффициента корреляции r для визуальных измерений магнитных полей пятен (2010 – 2017 гг) разной полярности с напряженностью > 2500 Гс на БСТ-2 (КрАО РАН) и в Mount Wilson Observatory, а также данных, полученных по общему магнитному полю (ОМП) Солнца на БСТ-1 и в Wilcox Solar Observatory. Показано, что для абсолютных значений магнитных полей пятен (или для полей только одного знака) $r = 0.33$, тогда как для всех измерений с учетом знака $r = 0.99$. Полученный «парадокс» объясняется достаточно надежным определением знака полярности пятен, в то время как измерения значений магнитных полей на разных инструментах существенно расходятся. Это также свидетельствует о сильной зависимости коэффициента корреляции r от выборки значений поля, учитывающей его знак.

Для ОМП величины КрАО систематически больше величин WSO, что объясняется особенностями инструментов и условиями наблюдений магнитных полей. В отличие от предыдущего случая отмечается, что сравнивать между собой величины ОМП нужно только со знаком. Сравнение величин по модулю некорректно, поскольку необходимо принимать во внимание на диаграммах рассеяния расположение линии регрессии относительно центра координат.

Расчет коэффициента корреляции без учета отмеченных выше особенностей может приводить к некорректным выводам.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и Программы Президиума РАН П-12 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной».

МЕРИДИОНАЛЬНЫЙ ДРЕЙФ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ФОТОСФЕРЫ В 21 – 24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

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

¹ИЗМИРАН, СПб филиал, г. Санкт-Петербург, Россия, helena@EV13934.spb.edu

²ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия

На основе синоптических карт фотосферного магнитного поля, полученных Национальной Солнечной Обсерваторией Китт Пик за 1978-2016 гг., построена диаграмма широта-время магнитного поля. При усреднении значений напряженности по долготе учитывался знак магнитного поля. Чтобы рассмотреть особенности распределения слабых магнитных полей, был установлен верхний предел напряженности, равный 5 Гс.

На диаграмме широта-время отчетливо видны наклонные полосы, соответствующие магнитным потокам положительной и отрицательной полярности, дрейфующим по направлению к полюсам Солнца. Наблюдаются две группы потоков: а. относительно узкие полосы, с чередующейся полярностью, начинающиеся вблизи от экватора и доходящие почти до полюсов Солнца. По оси времени протяженность потока одной полярности составляет порядка 1-2 лет; б. короткие мощные потоки, шириной 3-4.5 года, распространяющиеся от пятенной зоны к полюсам. Приход этих потоков к полюсам совпадает по времени с инверсией полярного поля. По-видимому, эти потоки представляют собой, так называемое, явление Rush to the Poles.

Картина переноса магнитных полей существенно различна для северного и южного полушарий. Чередование потоков положительной и отрицательной полярностей наиболее отчетливо проявляется для южного полушария в периоды положительной полярности южного полярного поля. Для северного полушария картина гораздо менее четкая, но для отдельных интервалов времени можно проследить чередование потоков разной полярности. Наклон полос, соответствующих магнитным потокам разной полярности, позволяет оценить скорость меридионального дрейфа магнитных полей, которая для двух полушарий несколько отличалась: $V=(16\pm2)$ м/с для южного полушария и $V=(21\pm4)$ м/с для северного полушария. Полученные результаты свидетельствуют о том, что распределение слабых магнитных полей по поверхности Солнца имеет сложную структуру, различную для двух полушарий и изменяющуюся от цикла к циклу.

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ СТРУКТУР В СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ С ПОДАВЛЕННОЙ ЭРУПЦИЕЙ

Вовченко И.В.¹, Зимовец И.В.¹, Шарыкин И.Н.¹, Мышьяков И.И.²

¹ИКИ РАН, Москва, Росси, trample.mensell@mail.ru

²ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

В данной работе продолжается анализ вспышки, исследованной ранее в работах [1, 2]. Для анализа магнитных структур использовались кубы магнитного поля 97x103x73 с временным разрешением 135 секунд, восстановленного при помощи оптимизационного NLFFF метода по фотосферным векторным магнитограммам HMI/SDO. Основной целью данной работы является выделение, визуализация и исследование магнитных жгутов во вспышечной области для определения механизмов формирования жгутов и сдерживания их эрупции. Для количественного анализа и выделения жгутов используется скрученность $T_w = \frac{1}{4\pi} \int_0^L \frac{\text{rot } \mathbf{B} \cdot \mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^2} ds$ силовых линий магнитного поля, где $\mathbf{B}$ – магнитная индукция, L – длина силовой линии.

Анализ вертикального среза скрученностей силовых линий в окрестности предполагаемой области магнитного пересоединения показал, что область сильного тока локализована над фотосферной линией инверсии магнитной полярности между системами скрученных силовых линий, по всей видимости, представляющими магнитные жгуты. Анализ фотосферного среза скрученностей показал быстрое “движение” сильно скрученного конца одного из жгутов, что так же заметно и на видео события в каналах AIA/SDO 211, 193, 171 Å. Для более подробной детализации трёхмерной динамики исследуемых магнитных структур дополнительно рассчитывается несколько вертикальных срезов скрученностей большей площади. Также анализируется вопрос устойчивости жгутов на основе расчета индекса спада потенциального магнитного поля в активной области над жгутами.

Цитируемая литература:

- [1] Sharykin, I. N., Zimovets, I. V., Myshyakov, I. I., Meshalkina, N. S. Flare Energy Release at the Magnetic Field Polarity Inversion Line during the M1.2 Solar Flare of 2015 March 15. I. Onset of Plasma Heating and Electron Acceleration // The Astrophysical Journal, Volume 864, Issue 2, article id. 156, 18 pp. (2018).
- [2] Sharykin, I. N., Zimovets, I. V., Myshyakov, I. I. Flare Energy Release at the Magnetic Field Polarity Inversion Line During M1.2 Solar Flare of 2015 March 15. II. Investigation of Photospheric Electric Current and Magnetic Field Variations Using HMI 135-second Vector Magnetograms // <https://arxiv.org/abs/1905.03352>

НАЧАЛО 25 СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Головко А.А.

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

Начало солнечного цикла предваряется массовым появлением в зоне средних гелиоширот (40° - 60°) эфемерных активных областей (ЭАО). Данное явление было обнаружено в работе [1], и была оценена временная задержка между этим предвестником и началом цикла на средних широтах в 2 года [2]. Это дает возможность диагностики процесса начала цикла, что имеет практическое значение в задачах планирования.

Методом мультифрактальной сегментации фотосферных магнитограмм [3], который позволяет выявлять новые магнитные потоки, по магнитограммам SOLIS исследованы проявления магнитной активности в области средних широт от 40° до 60° . Проведена статистика числа магнитных узлов ЭАО, выявляемых таким методом. Обнаружен предвестник 24 солнечного цикла в виде всплеска числа магнитных узлов в 2007-2008 гг., значительно превышающего его фоновое значение, характерное для периода 2011-2015 гг. Этот предвестник на 2 года опередил начало цикла [4]. В первом полугодии 2016 г. началось увеличение числа магнитных узлов, аналогичное ситуации 2-го полугодия 2007 г., что можно считать предвестником начала 25-го цикла солнечной активности. В отличие от ситуации 24 цикла, массовое появление высокоширотных АО нового 25-го цикла произошло позже всплеска числа ЭАО примерно на 3 года.

Активные области нового 25-го цикла регистрируются наблюдениями (www.solen.info/solar/cycle25_spots.html) с 2017 года, и в первом квартале 2019 года число их составило 12 (в марте 2019 г. АО №№12734-12737 по NOAA). Во втором и третьем кварталах их число несколько уменьшилось (АО №№12738-12752, старого и нового циклов), но в четвертом квартале 2019 года наблюдалось 13 АО нового цикла. В начале 2020 года возникли АО №№12753, 12755, 12756 нового цикла.

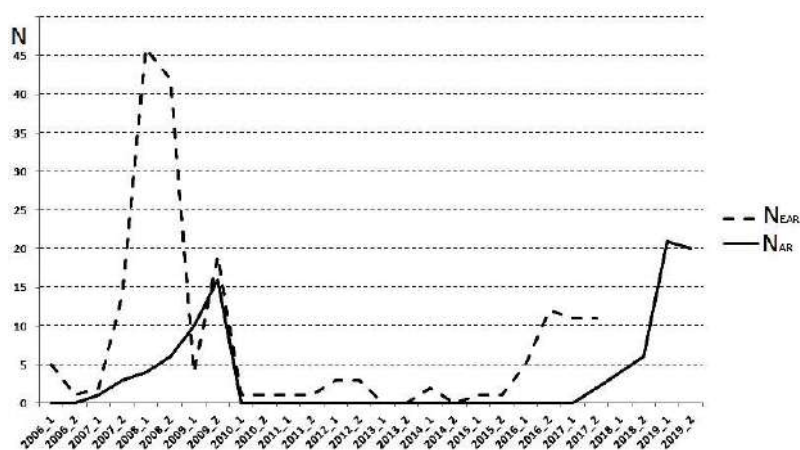


Рис.1. Изменение числа ЭАО N_{EAR} и числа новых высокоширотных АО N_{AR} в 2006-2019.

1. Wilson P.R. et al. // Nature 1988. V. 333. P. 748.
2. Harvey K.L. //Magnetic Bipoles on the Sun. 1993. 348 P.
3. Golovko A.A., Salakhutdinova I.I. // JASTP2018. V. **179**. P. 120.
4. Golovko A.A.//Astron. Tsirkular 2018. No. 1639.

ОСОБЕННОСТИ ВЫХОДА НОВЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ 1-7 СЕНТЯБРЯ 2017 г. АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ №12673

Головко А.А., Салахутдинова И.И.

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

Анализ временных изменений магнитного поля по данным магнитографа SOT Hinode выполнялся с применением микроканонического метода мультифрактальной сегментации, который позволяет выявлять новые магнитные потоки [1-3]. Карты продольной компоненты поля H_z и двух поперечных компонент H_x , H_y обрабатываются отдельно и полученные сегментированные изображения суммируются. В результате, получается детальная картина расположения новых потоков на текущий момент времени получения магнитограммы.

Активная область №12673 показала высокую вспышечную активность и произвела 3 вспышки балла X в течение охватываемого периода наблюдений. В ней интенсивно происходил выход новых магнитных потоков, взаимодействующих друг с другом [4]. Кривая суммарной площади новых потоков по мультифрактальным сегментированным картам S (Рис. 1) демонстрирует эту динамику. Выход новых потоков 6-7 сентября сопровождался мощными вспышками. Коэффициент вариации достиг 94% (сильная вариабельность). Для сравнения, та же величина для АО №10488 в период её формирования 26-28.10.2003, без вспышек, составила 17%, что выражает среднюю вариабельность.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16.1.6, Государственного задания №075-00441-19-02.

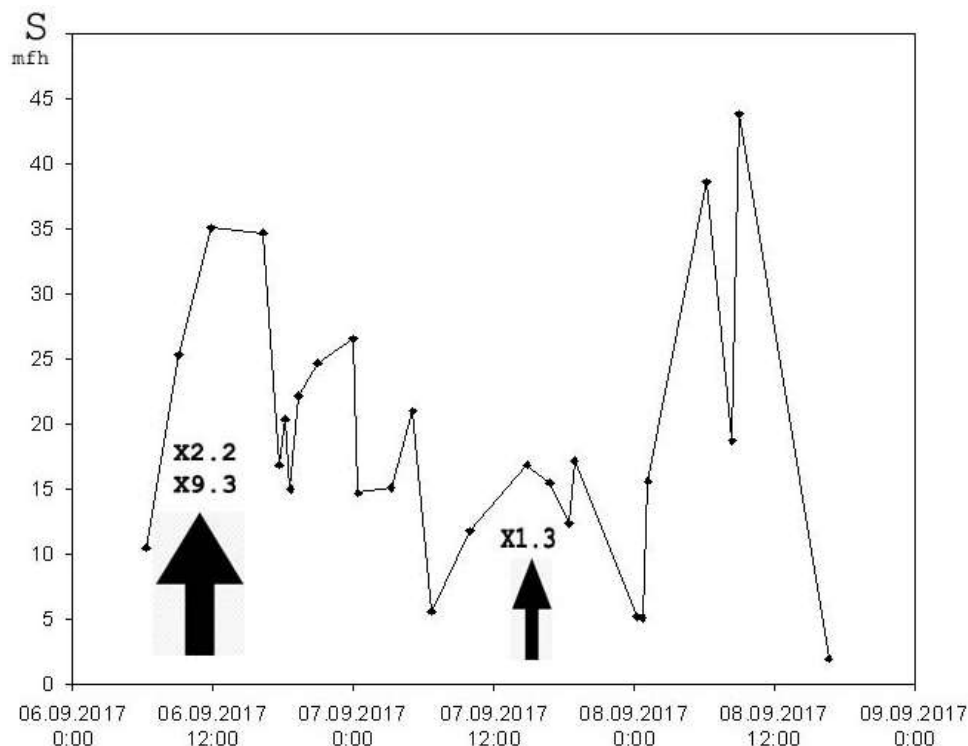


Рис. 1. Кривая изменения суммарной площади S (в миллионных долях полусферы) новых магнитных потоков в АО №12673. Стрелками нанесены моменты наиболее мощных вспышек.

1. Макаренко Н.Г., Князева И.С. // Известия ВУЗов Прикл. Нелин. Динамика. **17**, С. 85.
2. Головко А.А., Салахутдинова И.И. // Астрон. журнал. 2015. Т. **92**. С. 650.
3. Golovko A.A., Salakhutdinova I.I. // JASTP 2018. V. **179**. P. 120. Yang S., Zhang J., Zhu X., Song Q. // Astroph. Journ. Letters 2017. V. 849. L21.

ОСОБЕННОСТИ ДЛИТЕЛЬНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК В 23 И 24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

Григорьева И.Ю., Шаховская А.Н.

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

Проведено статистическое исследование длительных (LDE-)вспышек в мягком рентгеновском (SXR-)диапазоне для 23-его и 24-ого циклов Солнца. Построены диаграммы зависимости мощности LDE-вспышек и корональных выбросов массы (КВМ) от длительности этих вспышек. В результате нами получено, что значительная часть LDE-вспышек не связана с КВМ большой массы. Это противоречит гипотезе о поступлении энергии необходимой для поддержания постэруптивной фазы LDE-вспышек за счет энергии оседающей материи после эрупции КВМ. Однако большинство вспышек сопровождаются мини-эрупциями, которые могут иметь значение в энергетическом балансе LDE-событий. Из диаграммы мощность-длительность вспышек видно, что существует ограничение по энергии и максимальной мощности LDE-вспышки в SXR-диапазоне в LDE-событиях. По-видимому, это ограничение различается для 23-его и 24-ого циклов. Этот факт может указывать на существование ограничения максимальной энергии вспышки, которая может быть реализована в конкретном солнечном цикле.

ПРОТОННЫЕ ВСПЫШКИ С НЕВЫРАЖЕННОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗОЙ

Григорьева И.Ю., Струминский А.Б.

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

Импульсной фазой традиционно считается время наблюдения жесткого рентгеновского (HXR) и микроволновое (μ -)излучения до максимума в мягком рентгеновском (SXR) излучении [1]. Протонные вспышки со слабой импульсной фазой в μ -излучении изучались ранее, более 20 лет назад [2, 3]. В нашей работе рассмотрены мощные протонные события со слабыми проявлениями в μ -излучении из списка в [4] и вспышка X1.4 22 сентября 2011 года [5], возможно, дополняющая этот список. Здесь под *невыраженной* импульсной фазой в SXR-диапазоне мы подразумеваем отсутствие корреляции между нетепловым (HXR- и μ -) и SXR-излучением. В таких событиях наблюдается запаздывание максимума меры эмиссии плазмы, излучающей в SXR, относительно максимума ее температуры. Это, по-видимому, указывает на развитие вспышки в большом объеме (увеличение числа и размера вспышечных петель), а не на эффективный нагрев хромосферной плазмы ускоренными электронами.

Для 5 выбранных событий рассмотрены имеющиеся наблюдения солнечного SXR-, HXR-, μ -излучения и частиц СКЛ в межпланетном пространстве (электроны - SOHO EPHIN, протоны – NM, ACS SPI, GOES). Анализ потоков и мгновенных флюенсов μ -излучения показал, что ускорение электронов до релятивистских энергий продолжалось более 20 минут, т.е. во вспышках было длительное постэруптивное ускорение. В этих событиях в межпланетном пространстве не наблюдались релятивистские электроны, ускоренные в импульсной фазе, так как их потоки вблизи Земли были задержаны относительно нее и приходили вместе с потоками протонов. Временные профили их были подобными, время сохранения этого подобия и является временем ускорения. Разница в начале возрастания электронов в различных энергетических каналах SOHO/EPHIN показывает темп набора энергии релятивистскими электронами 1,67 кэВ/с (~ 2 кэВ/с). Поскольку релятивистские электроны не ускоряются на ударной волне [6], то единственным возможным механизмом ускорения, остается стохастическое ускорение, когда частицы приобретают энергию во множестве элементарных актов, чья длительность много меньше всего процесса.

1. Benz A. // Living Rev. Solar Phys. 2017. V.14. id.2 (59 pp).
2. Дайбог Е.И., Столповский В.Г., Мельников В.Ф. и др. // ПАЖ. 1989. Т.15. С.991.
3. Daibog E.I., Melnikov V.F., Stolpovskii V.G. // Solar Phys. 1993. V.144. P.361.
4. Grechnev V.V., Kiselev V.I., Meshalkina N.S., et al. // Solar Phys. 2015. V. 290. P.2827.
5. Григорьева И.Ю., Струминский А.Б., Шаховская А.Н. // Труды XXIII Всерос. Ежегод. Конф. «Солнечная и солнечно-земная физика-2019», ГАО РАН 2019, С.123.
6. Miller J.A., Cargill P.J., Emslie A., et al. // J. Geophys. Res., 1997. V.102. P.14631.

КАТАЛОГ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ С НАРУШЕНИЕМ ЗАКОНА ПОЛЯРНОСТЕЙ ХЕЙЛА В 1989-2018 ГГ.

Жукова А.В.¹, Хлыстова А.И.², Соколов Д.Д.³, Абраменко В.И.¹

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

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

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

Данные инструментов HMI/SDO и MDI/SOHO, фотогелиографические данные DPD (<http://fenyi.solarobs.csfk.mta.hu/DPD>), каталоги групп солнечных пятен the Royal Observatory, Greenwich – USAF/NOAA (<https://solarscience.msfc.nasa.gov/greenwch.shtml>), обсерваторий Mount Wilson (ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_REGIONS/Mt_Wilson) и КрАО (<http://sun.crao.ru/databases/18-catalog-mmс-ао>) использованы при изучении активных областей (АО), появившихся на видимой стороне солнечного диска в период с 01.01.1989 по 31.12.2018. Предметом исследований являлось нарушение у АО закона полярностей Хейла.

Проанализированы основные возможные причины расхождения в оценках относительного содержания анти-Хейлов от нескольких единиц до ~10 % у разных авторов [1–7]. Помимо очевидной неоднородности в исходных данных существуют также неточности и рассогласование непосредственно в определении принадлежности АО к анти-Хейлам.

Систематизированы сложности, возникающие при идентификации АО в качестве анти-Хейлов: неоднозначность в определении границ АО; наличие мелких пятен/пор противоположной полярности вблизи остатков лидеров АО; всплытие нового магнитного потока в границах разрушающихся АО; наличие флоккульных областей противоположной полярности вокруг одиночных пятен; наложение потоков разных АО; расположение АО вблизи лимба (эффект проекции) и около экватора (несовпадение магнитного и гелиографического экваторов), распределение АО между циклами в периоды минимумов [4].

Предложены критерии определения принадлежности групп солнечных пятен к анти-Хейлам: наличие у АО пор/пятен обеих полярностей в течение не менее 3-х дней; формирование между ними устойчивых магнитных связей; достаточная концентрация пор/пятен каждой полярности; расположение в одном полушарии центра тяжести группы пятен, средней точки между основными порами/пятнами противоположных полярностей. Для анти-Хейлов, всплывающих вблизи или непосредственно в границах старых АО, дополнительными критериями служат достаточная сила и обособленность нового потока, отсутствие стабильных магнитных связей с окружающими старыми пятнами.

С учетом предлагаемых критериев составлен каталог анти-Хейлов. Для каждой из АО приведены номер NOAA; дата и координаты АО в момент достижения ею максимального развития (наибольшей суммарной площади пятен) по данным Greenwich и DPD; величина суммарной площади пятен; достигавшийся АО максимально сложный магнитный класс по классификации обсерватории Mount Wilson.

Каталог доступен на вебсайте (<http://sun.crao.ru/databases/19-catalog-anti-hale>).

Работа поддержана РФФ (проект 18-12-00131).

1. Hale G.E., Nicholson S.B. // *Astrophys. J.* 1925. V. **62**. P. 270.
2. Wang Y.M., Sheeley N.R. // *Solar Phys.* 1989. V. **124**. P. 81.
3. Stenflo J.O., Kosovichev A.G. // *Astrophys. J.* 2012. V. **745**. P. 129.
4. McClintock B.H., Norton A.A., Li J. // *Astrophys. J.* 2014. V. **797**. P. 130.
5. Sokoloff D.D., Hlystova A.I., Abramenko V.I. // *MNRAS* 2015. V. **451**. P. 1522.
6. Li J. // *Astrophys. J.* 2018. V. **867**. P. 89.
7. Abramenko V.I., Zhukova A.V., Kutsenko A.S. // *Geomagn. and Aeron.* 2018. V. **58**. P. 1159.

О ВЛИЯНИИ ШУМА НА СТРУКТУРУ КВАЗИ-ДВУХЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ ПЛОЩАДИ СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

¹Костюченко И.Г., ²Бруевич Е.А.

¹Филиал АО “НИФХИ им. Л.Я. Карпова”, г. Москва, Россия, irkost46@gmail.com

²МГУ им. М.В. Ломоносова, ГАИШ, Москва

Квази-двухлетние вариации (КДО) солнечной активности наблюдаются во всех индексах солнечной активности и считаются одним из ее фундаментальных свойств. Однако природа КДО остается непонятой. Одним из хорошо установленных свойств КДО является непостоянство периода, причем считается, что он изменяется хаотично. Для исследования изменчивости периода КДО удобно применять частотно-временные методы анализа, в частности, вейвлет-анализ. Наиболее часто в астрофизике в качестве базовой функции используется комплексный вейвлет Морли, который позволяет выделить наиболее значимые за исследуемый интервал времени периоды КДО, но частично сглаживает и усредняет результаты.

Для выявления параметров индивидуальных всплесков больше подходят реальные базовые функции. Ранее для исследования закономерности изменения периода КДО площади солнечных пятен в цикле солнечной активности мы использовали реальный вейвлет Добеши 10. Мы обнаружили, что в каждом цикле СА на временном масштабе меньше 3-3.5 лет периоды изменяются не беспорядочно, а монотонно уменьшаются, причем синхронно с изменением средней широты солнечных пятен.

В данной работе мы исследуем возможное влияние шума на полученный результат. Проводится анализ устойчивости наблюдаемых периодичностей путем сравнения результатов вейвлет-преобразования временных рядов, синтезированных на основе различных комбинаций синусов с добавлением красного шума, сходного по параметрам с шумом, генерируемым флуктуациями в конвективном потоке. Также проводится сравнение вейвлет-карт натурального временного ряда площадей солнечных пятен и синтезированного на основе комбинации сглаженного натурального временного ряда с добавлением различных реализаций красного шума.

PROPAGATION OF MAGNETO-ACOUSTIC WAVES IN HELICAL MAGNETIC STRUCTURES OF SUNSPOTS

Кузанын К.М.¹, Анфиногентов С.В.², Yang Sh.³, Yan Y.³

¹ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, kuzanyan@izmiran.ru

²ИСЗФ САО РАН, г. Иркутск, Россия, anfinogentov@iszf.irk.ru

³Key laboratory for Solar Activity, National Astronomical Observatories of China, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, yangshb@nao.cas.cn

The recent SDO HMI high cadence high-resolution multi-wavelength data allow one to study these oscillations in detail including their vertical structure.

PWF methods applied to the data enable us to extract the fine structure of the swirl inside an oscillating sunspot and trace its spiraling nature.

Superposing various multi-wavelength data enables to see the vertical structure of the swirl above a sunspot. Thus we can see how helical structures expand from the level of solar photosphere into the chromosphere and further on to corona.

Tracking the 3D structure of oscillation waves enables us to proxy the magnetic field lines-of-force, and to study their dynamics. By using the Local Correlation Tracking technique (LCT) we can compute the phase velocities of sunspot oscillations at several levels above the photosphere and quantify its swirling dynamics.

This study aims in detailed three-dimensional dynamic description of sunspot swirling oscillations and shedding a light into the problem of helicity transfer from the solar interior to the heliosphere.

We established the effect of the magnetic field topology upon the properties of propagating magneto-acoustic waves. Our major results stands for qualitative similarity of the spatial distribution of phase vorticity of magneto-acoustic waves in lower corona in sunspots and maps of current helicity density obtained from photospheric vector magnetograms. This explains the origin of the polarization wave in sunspots (and magnetic tubes below) the photosphere.

The elaborated methods of analysis of phase vorticity of the acoustic waves can be applied for broader statistical samples of sunspots. This enables us to estimate the large scale properties of proxies of magnetic helicity in the solar photosphere. Using this technique in the future we may challenge the hemispheric helicity sign rule and its variability with the solar cycle.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, и при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-52-53045 ГФЕН_а.

МНГОВОВЛНОВЫЙ АНАЛИЗ ФАЗЫ СПАДА УСРЕДНЕННОГО ПРОФИЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

Куприянова Е.Г.¹, Кашапова Л.К.^{2,3}, Брумол А.-М.⁴, Ларионова А.И.¹

¹ ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru

² ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, ikk@iszf.irk.ru

³ Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

⁴ Университет Варвик, г. Ковентри, Великобритания

В настоящее время нет однозначной модели, описывающей энергетические процессы, происходящие во время фазы спада солнечных или звездных вспышек. Исследования в этой области тесно связаны с физикой вспышек, а также с пониманием степени подобия процессов в таких разных по энергетике явлениях, как солнечные и звездные вспышки. Нет сомнений, что определяющую роль на фазе спада играют процессы охлаждения плазмы, тесно связанные с теплопроводностью вспышечной плазмы, зависящей от начальных параметров плазмы, различных даже для разных уровней солнечной атмосферы. Одним из методов проведения исследований процессов охлаждения, является выявление эмпирических законов, описывающих поведение усредненного профиля вспышки во время фазы спада, полученных как для различных уровней солнечной атмосферы, так для звездных вспышек.

Цель настоящего исследования заключается в создании эмпирического шаблона фазы спада солнечных вспышек по наблюдениям SDO/AIA в полосах 1600 Å, 1700 Å и 304 Å, а также в тестировании применимости метода Давенпорта, предложенного в работе [1], для построения усредненных профилей солнечных вспышек.

Всего за 2010–2017 гг. для полос 1600 Å и 304 Å было отобрано 102 события, из которых 54 события имели отклик в полосе 1700 Å. Нами проведено фиттирование полученных усредненных временных профилей комбинацией двух экспоненциальных функций и одной экспоненциальной функцией, имеющей точку перегиба. Проводится анализ результатов фиттирования усредненного временного профиля различными функциями, а также сравнение коэффициентов, полученных для разных уровней солнечной атмосферы как друг с другом, так и коэффициентами, полученными для вспышек звезды класса M4 [1].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-52-10001 Ко-а.

1. Davenport et al. // *Astrophys. J.*, 2014, V. 797, P. 122

УСИЛЕНИЕ И ПОГЛОЩЕНИЕ ВИСТЛЕРОВ НЕТЕПЛОВЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ ВО ВСПЫШЕЧНЫХ ПЕТЛЯХ

Мельников В.Ф.¹, Филатов Л.В.²

¹ ГАО РАН, г. С.-Петербург, Россия, v.melnikov@gaoran.ru

² Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Установлено, что эффективное усиление (генерация) вистлеров во вспышечной петле с анизотропным распределением энергичных электронов возможно только, когда реализуется хотя бы одно из следующих условий: а) наличие достаточно сильнойpitch-угловая анизотропии нетепловых электронов; б) магнитное поле относительно слабое (менее 200 Гс); в) плотность плазмы относительно велика (более 10^{10} cm^{-3}). В противном случае, энергичные электроны, наоборот, будут не генератором, а мощным поглотителем энергии вистлеров, присутствующих во вспышечной петле.

МЕТОД МСМС ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ФУНКЦИИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА

Нечаева А.Б.^{1,2}, Зимовец И.В.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nechaeva.ab@phystech.edu

²МФТИ, г. Долгопрудный, Россия

Форма функции плотности вероятность фотосферных вертикальных электрических токов ($PDF(|j_z|)$) может представлять интерес для изучения процессов энерговыделения в активных областях (АО) Солнца. В докладе Зимовца и др. [1] описан способ получения $PDF(|j_z|)$ и, в качестве первого шага, выполнена аппроксимация полученных $PDF(|j_z|)$ методом наименьших квадратов с помощью функции `nlinfit` языка MATLAB. В данном докладе представлен другой способ аппроксимации $PDF(|j_z|)$ заданными аналитическими функциями с помощью метода Markov chain Monte Carlo (MCMC). Этот метод позволяет аппроксимировать распределение параметров моделей с помощью генерации Марковской цепи, равновесное распределение которой – нужное нам распределение. Более глубоко суть этого метода будет раскрыта в докладе. Аппроксимация проводилась двумя видами функций: 1) комбинацией функции Гаусса и степенной функции, 2) каппа-функцией. Мы получили, что показатели степенной и каппа-функций совпадают в пределах погрешностей. На основе Байесовского информационного критерия (BIC), позволяющего сравнивать модели на разных выборках, был сделан вывод о предпочтительности использования модели гауссианы для низких значений плотностей тока и степенной функции для более высоких значений тока по сравнению с каппа-функцией.

1. Зимовец И.В., Нечаева А.Б., Шарыкин И.Н., Chen F., Gan W.Q. // Тезисы Пятнадцатой ежегодной конференции Физика плазмы в солнечной системе, 10-14 февраля 2020, ИКИ РАН, Москва.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В ЗАДАЧЕ ИНВЕРСИИ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Плотников А.А.^{1,2}, Князева И.С.¹

¹ ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

² КрАО РАН, п. Научный

Методы инверсии являются мощным инструментом для извлечения параметров звездных атмосфер из наблюдаемых спектральных линий. Суть этих методов заключается в поиске такого набора параметров атмосферы, при котором смоделированный спектральный профиль будет максимально точно аппроксимировать наблюдаемые данные. Поиск наилучших параметров может производиться каким-либо из многочисленных существующих методов оптимизации.

Повышение пространственного и спектрального разрешений инструментов негативно влияет на производительность таких методов. Значительно усложняет задачу также и повышение числа свободных параметров модели атмосферы.

В данной работе была предпринята попытка использования сверточной нейронной сети для получения параметров атмосферы из наблюдаемых профилей. Для минимизации влияния особенностей инструментов при обучении использовались только синтетические спектральные профили. Использование наборов параметров, полученных другими методами, позволило избежать проблем, связанных с высокой размерностью задачи.

Полученные результаты показывают хорошее согласие с результатами обработки в High Altitude Observatory. Нейронные сети демонстрируют значительный выигрыш во времени по сравнению с методами, базирующимся на алгоритме Левенберга-Марквардта.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 19-32-50043)

ОТНОШЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ ПОДФОТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Старкова Л.И.

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

Магнитное поле атмосферы Солнца создают подфотосферные источники. Есть указание на то, что основное влияние на это магнитное поле оказывают источники, которые формирует конвекция супергигантского и гигантского масштабов. Конвективные ячейки выносят магнитное поле, генерируемое в основании конвективной зоны, до подфотосферного уровня 0.98 радиусов Солнца. Были проведены оценки вкладов таких источников в магнитные поля фотосферы и короны Солнца. Оказалось, что вклад источников супергигантской конвекции в магнитное поле короны, в интервале высот 0.5 – 3 радиусов Солнца, превышает влияние источников гигантской конвекции в 2.5 раза. В тоже время, источники гигантской конвекции являются основным фактором появления фотосферных активных областей. И создаваемая ими напряженность на уровне фотосферы больше на два порядка, чем от источников супергигантской конвекции.

**АНАЛИЗ ЭВОЛЮЦИИ МЕХАНИЗМОВ ИЗЛУЧЕНИЯ СЛАБЫХ СОЛНЕЧНЫХ
ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ МИКРОВОЛНОВОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ДИАПАЗОНА
В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ №12565 И № 12567**

Торопова М.С., Кашапова Л.К.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, locle@mail.ru

Основной интерес к изучению слабых солнечных вспышек связан с тем, что их рассматривают как один из возможных агентов нагрева плазмы в хромосфере и короне. При этом механизмы генерации излучения и свойства плазмы этих явлений слабо изучены. Одна из причин связана с тем, что долгое время для большинства этих событий отсутствовала информация об излучении в микроволновом диапазоне в силу недостаточной чувствительности инструментов, работающих в этой области.

Начало регулярных наблюдений на Сибирском Радиогелиографе 4 - 8 ГГц (СРГ) показало возможность уверенно детектировать отклик событий класса В по GOES с помощью инструментов нового поколения. К настоящему моменту, на СРГ получены наблюдения большого числа слабых вспышек, имеющих класс В и С.

Цель данной работы: провести первичный анализ параметров плазмы (температура, мера эмиссии, наличие ускоренных электронов) для ординарных вспышек класс которых не больше С9. Нами были отобраны события, наблюдавшиеся на СРГ 20 июля 2016. Особенностью этого дня являлось то, что в этот день по данным GOES не было зарегистрировано событий выше класса М. Чтобы исключить артефакты, исследуемое событие должно было иметь одновременный отклик и на корреляционных кривых СРГ, и на временных профилях мягкого рентгеновского излучения с КА GOES. Температура и мера эмиссии была получена с использованием рентгеновских наблюдений RHESSI, FERMI и GOES. Обсуждается распределение событий по электронной температуре и наличию указаний на присутствие ускоренных электронов.

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВИСТЛЕРОВ НА РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

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

Микроволновое излучение вспышечной петли в короне Солнца генерируется, как известно, нетепловыми электронами, инжектируемыми в петлю в процессе вспышечного энерговыделения. Эти электроны частично удерживаются в петле как в магнитной ловушке и формируют ее микроволновое излучение. Его характеристики определяются механизмом гиротронного излучения и зависят от распределения нетепловых электронов, магнитного поля и плотности плазмы в петле.

В данной работе численно исследуется влияние взаимодействия ускоренных электронов и турбулентности вистлеров на характеристики микроволнового излучения. Распределения электронов по энергиям и pitch-углам в каждой точке неоднородной петли рассчитывается на основе диффузионного кинетического приближения и самосогласованных уравнений квазилинейной теории взаимодействия волн и частиц. Особенности характеристик микроволнового излучения (интенсивность, наклон спектра и др.) исследуются для двух случаев, реализуемых при определенных условиях в петле: 1)~в режиме заданной стационарной турбулентности, 2)~в режиме самосогласованной генерации и поглощения турбулентности нетепловыми электронами. Проводится сравнительный анализ излучения в указанных режимах.

О ТОНКОЙ СТРУКТУРЕ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРА В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

Фомичев В.В., Файнштейн, С.М., Чернов Г.П.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им.
Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Троицк Московской области, 108840,
gchernov@izmiran.ru*

Наблюдения радиоизлучения пульсара в Крабовидной туманности с помощью 300-метрового радиотелескопа обсерватории в Аресибо (Пуэрто-Рико) и динамического радиоспектрографа с уникальным временным разрешением (порядка долей наносекунд) позволили обнаружить тонкую структуру динамического спектра в виде сравнительно узких квазигармонических полос, параллельно дрейфующих во времени. Такая особенность динамического спектра проявляется в микроволновом диапазоне (на частотах > 8 ГГц) и только в предвестнике промежуточного импульса, который соответствует фазе вращения 205° . Во время самого промежуточного импульса с фазой 215° и основного импульса с фазой 70° фиксируется рентгеновское, оптическое и широкополосное радиоизлучение. Описанная картина аналогична зебра – структуре (ЗС) динамических спектров солнечных континуальных радиовсплесков IV типа. Для объяснения ЗС структуры радиоизлучения пульсара было предложено несколько схем. Наиболее разработанной является схема использующая аналогию ЗС структур в радиоизлучении пульсара в Крабовидной туманности и Солнца. Механизм излучения в этой схеме основан на выполнении условия двойного плазменного резонанса (ДПР) в источнике и может объяснить параметры ЗС только при условии $\omega_H \ll \omega_p$ (ω_H и ω_p гирочастота и плазменная частота электронов), т.е. в слабом магнитном поле. Поскольку магнитное поле нейтронной звезды большое (10^6 Гс и более) предполагается, что в магнитосфере пульсара должен быть нейтральный токовый слой по аналогии с солнечной ситуацией. Однако вопрос о существовании нейтрального токового слоя в магнитосфере пульсара является дискуссионным. В данной работе обсуждается альтернативный механизм генерации ЗС структуры радиоизлучения пульсара, основанный на взрывной неустойчивости при взаимодействии релятивистского потока ионов с плазмой. В этом случае исчезает проблема малости магнитного поля, а электромагнитное излучение в микроволновом диапазоне формируется при рассеянии низкочастотных плазменных волн на ускоренных ионах. Некоторые различия полос ЗС в разных радиовсплесках могут быть связаны с различной степенью неизотермичности плазмы, от которой зависит число полос. Кроме того, сверхтонкая структура полос может определяться различиями потоков быстрых протонов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №17-02-00308) и Проекта Минобрнауки КП19-270.

РАСЩЕПЛЕНИЕ ОСНОВНОГО ПЕРИОДА 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 1968-2018 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 применением модифицированного вейвлет-анализа (для фиксированной фазы колебания) показал, что основными периодами вращения ОМП являются 26.935 сут и 27.030 сут. Они проявляются как составляющие главного периода вращения $P = 26.983 \pm 0.008$ сут, который за четыре цикла активности расщепился на две компоненты, амплитуды которых изменяются от цикла к циклу. Колебания компонент находятся в одинаковой фазе в циклах 21 и 23, но в противофазе – в циклах 22 и 24 (рис. 1).

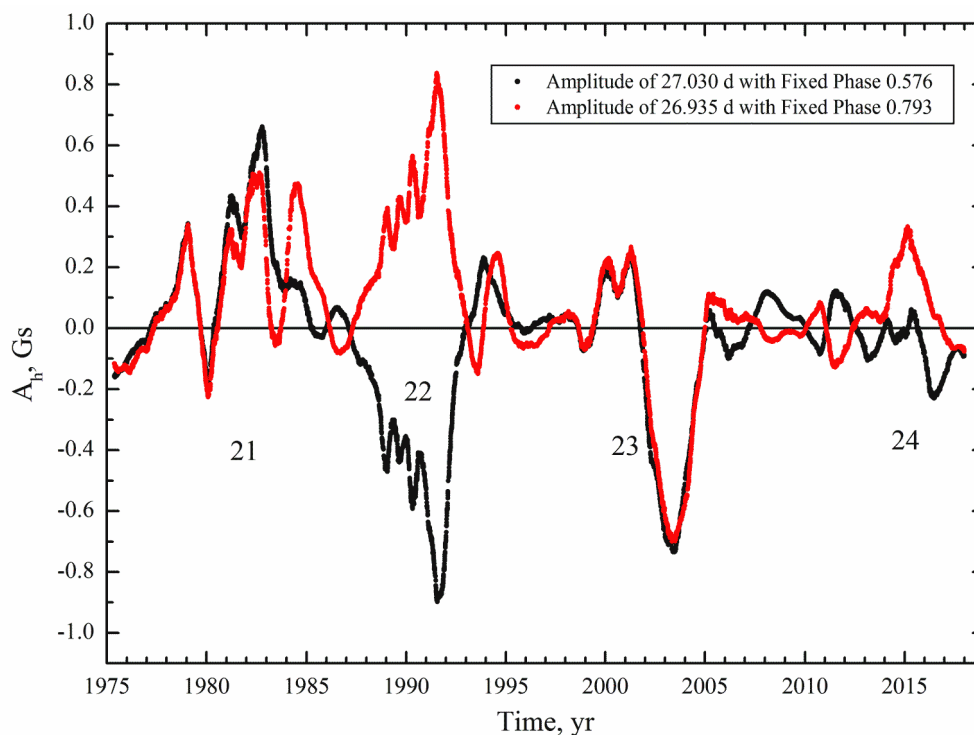


Рис.1. Изменение амплитуды колебаний двух периодов со временем, вычисленное для фиксированной фазы (отрицательные значения амплитуд означают, что колебание находится в противофазе по отношению к начальной, положительные – в фазе). В 21 цикле в целом было совпадение двух колебаний, в 22-м – колебания были в противофазе, в 23-м – в фазе, в 24-м скорее в противофазе.

Можно заключить, что Солнце ведёт себя преимущественно как магнитный диполь, который вращается с синодическим периодом 26.983 сут, меняя свой знак на противоположный приблизительно каждые 10.5 лет.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и Программы Президиума РАН П-12 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной».

О ЛАВИНООБРАЗНОЙ ИОНИЗАЦИИ ПЛАЗМЫ УБЕГАЮЩИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ СОЛНЦА

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

КрАО РАН, Научный, yur_crao@mail.ru

Рассмотрена возможность генерации жесткого рентгеновского и оптического излучения в нижней атмосфере Солнца в результате ускорения электронов суб-драйсеровскими электрическими полями. Предполагается, что проникновение высокоэнергичных электронов из короны в нижнюю атмосферу Солнца может привести к ионизации нейтральных атомов водорода посредством неупругих столкновений. Образующиеся вторичные электроны под действием суб-драйсеровских электрических полей становятся убегающими, что может привести к лавинообразной ионизации плазмы и ускорению большого числа частиц, генерирующих наблюдаемые потоки жесткого рентгеновского излучения. Характерная длина ионизации атомов в условиях нижней хромосферы и фотосферы Солнца заключена в пределах от нескольких сот метров до нескольких сот километров, что свидетельствует в пользу описанного выше сценария. Рассмотрены механизмы генерации электрических полей в нижней атмосфере Солнца.

Работа выполнена при частичной поддержке граната РФФИ № 18-02-00856 и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 12 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной».

ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКАХ В СОЛНЕЧНЫХ ПРЕДВСПЫШЕЧНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ

Шаин А.В., Мельников В.Ф., Соловьев А.А.

ГАО РАН, г. С.-Петербург, Россия, v.melnikov@gaoran.ru

Проведён анализ пространственной структуры коронального магнитного поля активной области AR12673 в течение нескольких часов перед вспышкой 4 сентября 2017 года, восстановленного в рамках нелинейного бессилового приближения. В качестве граничного условия для модели была использована информация о фотосферном векторном магнитном поле (SDO/HMI). Верификация восстановления проводилась по ультрафиолетовым данным SDO/AIA и радиоизображениям, полученным на Радиогелиографе Нобеляма. Рассчитаны 3D-распределения электрических токов во вспышечной области, изучена их пространственная динамика. В частности, показано, что пространственная структура электрических токов нестационарна. Характерные времена изменений токов и вариаций яркости радиоизлучения близки по величине. Наиболее сильные токи наблюдаются в средней области, где УФ петли скрещиваются, а микроволновое излучение сильно нестационарно.

ДИНАМИКА ФОТОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ И МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ЭРУПТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКЕ X4.9 25 ФЕВРАЛЯ 2014

Шарыкин И.Н., Зимовец И.В.

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

Работа посвящена исследованию динамики фотосферных источников излучения и магнитного поля во время мощной эруптивной солнечной вспышки рентгеновского класса X4.9, произошедшей 25 февраля 2014 г. на основе данных прибора HMI на борту КА SDO. Данное событие было выбрано в связи с тем фактом, что удачное расположение недалеко от лимба ($\sim S12E77$) и достаточное расстояние между вспышечными лентами позволило исследовать с высоким временным разрешением динамику проекции горизонтальной компоненты магнитного поля на луч зрения между лентами вблизи нейтральной линии (НЛ) магнитного поля с помощью 45-секундных магнитограмм HMI по лучу зрения. Стоит пояснить, что для активных областей вблизи лимба в магнитограммы по лучу зрения доминирующий вклад вносит горизонтальная компонента магнитного поля. На сегодняшний день известно, что горизонтальная компонента магнитного поля подвержена наиболее сильным вариациям во время солнечных вспышек. Однако не понятно, на каких временных масштабах такая динамика может происходить. Выбранная солнечная вспышка, благодаря своему расположению и мощности (магнитное поле должно сильно измениться), является отличным кандидатом для исследования быстропротекающих процессов перестройки магнитного поля вблизи НЛ. В работе построены временные последовательности изображений карт магнитного поля по лучу зрения, а также временные профили, показывающие динамику магнитного поля в сравнении с различными типами излучений. Показано, что значительные изменения магнитного поля происходили на временных масштабах импульсной фазы вспышки (~ 4 минут). Причем пики изменения “магнитного потока” совпадали с пиками производной потока мягкого рентгеновского излучения и потоком жесткого рентгеновского излучения (50-300 кэВ). Подчеркнем, что рассматривалась область между вспышечными лентами и парными источниками жесткого рентгеновского излучения, и возмущениями фотосферы за счет высыпающихся ускоренных частиц и излучения можно пренебречь. Также был произведен анализ динамики фотосферных источников по фильтрограммам HMI (временное разрешение 1.8 секунды). Показано, что во время изменения магнитного поля происходило параллельное движение парных фотосферных источников типа *zippering*. Произведены оценки скорости перемещения фотосферных источников ($\sim 10-40$ км/с).

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ НАГРЕТОЙ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ НЕЙТРАЛЬНОЙ ЛИНИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ДАННЫМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ОБСЕРВАТОРИИ IRIS ДЛЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ M6.5 GOES КЛАССА, ПРОИЗОШЕДШЕЙ 22 ИЮНЯ 2015 Г.

Шарыкин И.Н., Мышьяков И.И.

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

В рамках работы, производится анализ ультрафиолетовых спектров по данным Interface Region Imaging Spectrometer (IRIS) для солнечной вспышки M6.5 GOES класса, произошедшей 22 июня 2015 г. Выбор события, главным образом, связан с уникальными условиями наблюдений космическим УФ спектрографом. Дело в том, что были получены ультрафиолетовые спектры для 16 положений щели в режиме сканирования «Raster» в области НЛ. Причем щель была ориентирована практически параллельно НЛ и поэтому были хорошо измерены УФ спектры для областей по обе стороны НЛ, где зарождались первоначальные возмущения перед вспышкой, видные в течение часа до начала импульсной фазы. Основной задачей данной работы является детальное исследование динамики вспышечной плазмы в различных слоях солнечной атмосферы вблизи НЛ и ее сравнение со структурой магнитного поля во вспышечной области. Используя спектральные данные IRIS, мы исследуем распределение течений и уширений линий в предвспышечной фазе, в области вблизи НЛ, где развивались первоначальные возмущения. Был выполнен обширный анализ УФ излучения, в разных линиях, измеряемых IRIS. Однако для начала подробнее всего рассматривалась линия Si IV (температура формирования ~ 80000 К, область верхней хромосферы). Линия была выбрана, поскольку она меньше всего страдает от поглощения и при этом она достаточно яркая по сравнению с другими линиями в доступном волновом диапазоне. Анализ данных IRIS показал, что как турбулентные уширения, так и течения плазмы по лучу зрения наблюдались уже в предвспышечной фазе на НЛ. Затем после вспышки вся эта активность пропала. Таким образом, возможно, что наличие турбулентных процессов и течений плазмы вблизи НЛ в предвспышечной фазе является признаком приближающегося вспышечного энерговыделения. Выполнено сравнение карт магнитного поля и вертикального электрического тока с картами IRIS. Показано, что первоначальные возмущения возникали вблизи НЛ в области доминирующего горизонтального магнитного поля и сильного вертикального электрического тока. Исследуется топология магнитного поля вблизи НЛ по результатам экстраполяции силовых линий магнитного поля методом нелинейного бессилового магнитного поля.

ЭВОЛЮЦИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ В 23-24 ЦИКЛАХ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В РАДИОДИАПАЗОНЕ НА РАТАН-600

Шендрик А.В.^{1,2}; Кузанын К.М.¹, Богод В.М.², Курочкин Е.А.², Кальтман Т.А.²

¹ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, kuzanyan@izmiran.ru

²СПБФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, ashend90@gmail.com

За последние десятилетия накоплен систематический наблюдательный материал как по крупномасштабному магнитному полю и полям солнечных пятен на Солнце, так и по проявлениям активности в хромосфере и короне. Данные, включая полученные на отечественных инструментах РАТАН-600, покрывают более двух циклов активности и ранее недостаточно использовались для изучения солнечного цикла.

Основной целью исследования является получение систематических трассеров солнечного цикла в радио-диапазоне. Наш метод исследования состоит в проведении систематической обработки радиоданных РАТАН-600 с сопоставлением их с другими базами данных временных рядов, характеризующих активность Солнца. Актуальной задачей является формирование базы данных длительных временных рядов (несколько лет и даже десятилетий) с параметрами солнечной активности с привлечением радиоданных. Типичные используемые параметры для группы пятен: время, положение на диске, площадь, число пятен, классификация по Макинтошу, магнитная классификация, спектральная плотность потока радиоизлучения на волнах 3-18 ГГц и проч.

Только по данным наблюдений в 24-м цикле солнечной активности нами был выделен массив, состоящий более 650 активных областей, равномерно покрывающий за примерно 9 лет все фазы солнечного цикла, по которым проведена надежная идентификация радиоисточников по данным РАТАН-600 со сведениями из других баз данных, как SWPC NOAA, так и данными космического аппарата SDO. Выборка является статистически однородной и равномерно распределенной по солнечным долготам и широтам в обоих полушариях. В ходе проведения исследования особое внимание было уделено возникновению вспышечной активности на Солнце и их возможным предпосылкам (прекурсорам) по данным как радионаблюдений, так и сочетанием нескольких параметров, взятых из различных баз данных. Выделены отдельные закономерности.

В дальнейшем на основе проводимого анализа также возможно будет установить ключевые комбинации параметров, дающих предпосылки возникновения вспышечной активности на Солнце. В случае успеха, полученные закономерности на основе существующих баз данных будут иметь предсказательное значение для решения актуальных задач космической погоды.

Работа выполнена в рамках Государственного задания, и при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-32-50046 мол_нр.

1. Шендрик А.В., Богод В.М., Кузанын К.М., Курочкин Е.А. "Методика обработки наблюдений РАТАН-600 для изучения динамики плазменных струй и активности солнечного цикла" XXIII всероссийская ежегодная конференция «Солнечная и солнечно-земная физика-2019» (СПб, ГАО РАН) <http://www.gaoran.ru/russian/solphys/2019/>

ОЦЕНКА СОГЛАСОВАННОСТИ И ВОЗМОЖНОСТЬ КОРРЕКЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ВОССТАНОВЛЕННОЙ ЧАСТИ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА ДЛЯ СТАРОЙ И НОВОЙ ВЕРСИЙ

Шибает И. Г.

ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, ishib@izmiran.ru

При формировании восстановленной части ряда чисел Вольфа Wresl (1749 -- 1849 гг.) объединялись отрывочные данные с различными плотностью наблюдений, амплитудным разрешением и масштабированием. Это приведет к искажению локальных характеристик исследуемого процесса и отразится на взаимосвязи (гладкости) временных фрагментов разного масштаба. Поэтому важно оценить непротиворечивость параметров самого ряда Wresl и степень согласованности его с инструментальной частью ряда Wtool (с 1849 г. по настоящее время).

В работе исследуются статистические параметры протяженных фрагментов без детализации их «сложной» истории и сопоставляются характеристики выделенных интервалов [1,2]. Разделение циклов ряда Wtool на «длинные» и «короткие» позволяет параметризовать некоторые характеристики для групп циклов и аппроксимировать их эмпирические значения. Полученные функции использованы для оценки параметров ряда Wresl и показана их противоречивость. Предложены варианты коррекции длины и «мощности» восстановленного ряда и отмечено, что более реалистичному сценарию соответствует одновременное сокращение протяженности ряда на 3 - 4 года и **увеличение** «среднего» $\bar{W}$ в 1.2 раза.

Полученные оценки согласуются с результатом работы [1], где сопоставлены числа Вольфа и температурные ряды нескольких европейских центров и отмечено, что около 1925 г. и далее видна тенденция к синхронизации температурных характеристик, что отражает рост и возросшее влияние солнечной активности. Подобная ситуация, с синхронизацией температурных характеристик, отмечается и до 1850 г., т.е. необходимое «усиление» солнечной активности на этом интервале (по аналогии с периодом после 1925 г.) наложилось на минимум Дальтона.

1. Шибает И.Г. Оценка восстановленной части ряда ежемесячных чисел Вольфа (1700—1849 гг.) по характеристикам его достоверной части (1849—2009) и температурным рядам / Труды Всероссийской ежегодной конференции по физике Солнца: Солнечная и солнечно-земная физика -- 2010, Пулково, Санкт –Петербург, 03 – 09 октября 2010 г., с. 455-458.

2. Shibaev I., Ishkov V. Investigation of the statistical characteristics of Wolf numbers reliable series: signs of solar cycles likelihood // SENS 2011, Sofia 2012, p. 297 – 301.

GROUND ECHOES DETECTED BY VHF METEOR RADAR IN THE SUBSTORM GROWTH PHASE

Kozlovsky A. E.

SGO, Sodankylä, Finland, alexander.kozlovsky@oulu.fi

The observations are made at the Sodankylä Geophysical Observatory (SGO, geographic coordinates 67° 22' N, 26° 38' E), which is located in the vicinity of the equatorward edge of the nightside auroral oval. The SGO meteor radar radio waves at frequency $f_r = 36.9$ MHz are sometime reflected in the ionospheric E layer toward the sea surface and then scattered back, so that the radar receives ground echoes. This may occur for the waves transmitted at low elevation ($el < 25^\circ$) to horizon if the E-layer electron density is large enough, up to $2 \cdot 10^{12} \text{ m}^{-3}$ (corresponding to a plasma frequency, $foEs$ of about 13 MHz) at about 110 km altitude. Such events are typically associated with the substorm growth phase auroral arcs.

The amplitude of the echoes is modulated at a frequency of a few Hz, and similar modulation was found in the auroral luminosity at 427.8 nm near the locations of the bending of MR radio waves. A few-Hz fluctuations of electron precipitation in the arc cause corresponding amplitude fluctuations of the ground echoes, due to which the meteor radar erroneously accepts such echoes as backscatters from meteor trails. Although such a few-Hz variation of the auroral precipitation cannot produce more than 1% modulation of the ionospheric electron density, even such a small modulation can lead to 50% modulation of the MR ground scatter provided $foEs \approx f_r \sin(el)$.

Statistics of the ground echoes observed since January 2009 show their predominant occurrence in summer, with no clear dependences on the solar activity. In two cases when suitable EISCAT observations were available, a high E-layer electron density of the order of 10^{12} m^{-3} was detected in the presumable region of reflection of radar waves.

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОРАДИЧЕСКИХ Е-СЛОЕВ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ АНАЛИЗА РАДИОЗАТМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПУТНИКОВ CHAMP И COSMIC

Губенко В.Н., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Андреев В.Е., Губенко Д.В., Павельев А.А.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, vngubenko@gmail.com

Сдвиг зонального ветра считается основным драйвером ионной конвергенции на высотах ниже ~115 км в средних широтах [1, 2]. В высоких широтах ($>60^\circ$) магнитное поле направлено почти вертикально к локальному горизонту, и механизм формирования спорадических Е-слоев с помощью ветрового сдвига не будет столь же эффективным, как в средних широтах. Крупномасштабная горизонтальная структура плазмы в Е-области авроры определяется пространственным распределением источников солнечной радиации и осадков частиц. Здесь внутренние атмосферные волны менее важны в качестве механизма вертикального структурирования слоев из-за большого угла наклона ($\sim 90^\circ$) магнитного поля к локальному горизонту. Тем не менее, малый угол отклонения магнитного поля от вертикали очень существенен вследствие больших электрических полей, направленных перпендикулярно магнитному полю. Ниже уровня ~110 км в высоких широтах, спорадические Е-слои в ионосфере Земли могут быть сформированы в результате воздействия электрического поля, где механизм ветрового сдвига не работает [1, 2].

Радиозатменные измерения спутников CHAMP и COSMIC были использованы нами для исследования спорадических Е-слоев в ионосфере Земли. Параметры ионосферных структур определялись на основе анализа высотных зависимостей эйконала (фазового пути) и интенсивности радиозатменных сигналов, зарегистрированных на несущей GPS-частоте 1575,42 МГц с помощью низкоорбитальных спутников CHAMP и COSMIC. В случае нарушения сферической симметрии, разработанный нами метод позволяет оценить смещение спорадического слоя по отношению к перигею радиолуча, определить угол наклона слоя к локальному горизонту и найти фактическую высоту его расположения [3, 4]. В обычных условиях ионосфера планеты вносит малый вклад в изменения амплитуды сигналов, регистрируемых в радиозатменных экспериментах. Возмущенная ионосфера может значительно влиять на фазу и амплитуду радиоволн. Сильные амплитудные и фазовые вариации сигналов систематически наблюдаются в интервале высот перигея луча 30–85 км, расположенного выше основной части нейтральной атмосферы и ниже Е-слоя ионосферы Земли. При выполнении условия сферической симметрии в радиозатменном эксперименте можно считать, что высота расположения спорадического Е-слоя равна высоте перигея лучевой линии. Однако, это условие может нарушаться при наличии горизонтальных градиентов в ионосфере. В работах [3, 4] показано, что возмущения амплитуды и фазы радиоволн, наблюдаемые при низких высотах перигея луча, объясняются влиянием наклонных плазменных структур, расположенных существенно выше в ионосфере. Данные об амплитудных и фазовых вариациях радиозатменных сигналов на низких высотах являются дополнительным источником информации для дистанционного зондирования ионосферы Земли, включая детектирование внутренних атмосферных волн и определение их характеристик на ионосферных высотах [1, 2].

В докладе представлены вертикальные распределения спорадических Е-слоев в ионосфере Земли, полученные на основе обработки измерений эйконала и интенсивности радиозатменных сигналов, зарегистрированных с помощью спутников CHAMP/GPS и COSMIC/GPS. Проанализированы типы спорадических Е-структур (дискретные и двойные слои), наблюдаемых в радиозатменных экспериментах. Рассмотрены механизмы формирования спорадических Е-слоев (ветровой сдвиг и высыпание частиц) в ионосфере высоких и средних широт планеты.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и программой № 12 Президиума РАН.

1. Gubenko, V.N., Pavelyev, A.G., Kirillovich, I.A., Liou, Y.-A. // *Advances in Space Research*. 2018. V. **61**, P. 1702–1716, doi: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
2. Gubenko, V.N., Kirillovich, I.A. // *Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. **5**, P. 98–108, doi: 10.12737/stp-53201912.
3. Pavelyev, A.G., Liou, Y.A., Zhang, K. et al. // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. **5**, P. 1–16.
4. Pavelyev, A.G., Liou, Y.A., Matyugov, S.S et al. // *Atmos. Meas. Tech.* 2015. V. **8**, P. 2885–2899, doi: 10.5194/amt-8-2885-2015.

О ТОЧНОСТИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МАКСИМУМА СЛОЯ F2 В АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Крашенинников И.В., Лещенко Л.Н.

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

Основным источником данных о положении главного ионосферного максимума – слоя F2 являются ионозонды вертикального радиозондирования ионосферы. Несмотря на то, что их функционирование основано на различных базовых типах сигналов интерпретация данных радиозондирования – ионограмм ВЗ выполняется, в основном, двумя программами автоматического распознавания следов на ионограмме и восстановления высотного профиля электронной плотности (по степени распространенности): ARTIST для ионозондов DPS-4 [1] и универсальная - Autoscala [2]. В ИЗМИРАН ведутся регулярные обсерваторские наблюдения двумя ионозондами: “Парус-А”, на котором наряду с автоматической системой Autoscala [2] производится ручная операторская обработка часовых данных, включающая процедуру восстановления высотного профиля MPOLAN [4], и DPS-4 с системой ARTIST 5 с программой оценки $Ne(h)$ -профиля [3]. Разность во времени съема ионограмм составляет 1 минуту, что можно рассматривать как, практически, одновременную работу ионозондов.

В данной работе представлены результаты анализа оценки параметров максимума слоя F2 [$foF2, hmF2$] ионосферы двумя системами автоматического масштабирования и ручной обработки ионограмм ВЗ для 2018 г. – года низкой солнечной активности. На рис. 1 представлены суточные медианные зависимости параметра $hmF2$ для зимнего (январь) и летнего (июль) сезонов года в трех процедурах анализа данных. Можно видеть существенные различия в оценке высоты максимума слоя F2 двумя автоматическими методами, в частности, систематическое значительное занижение $hmF2$ в локально полуденное время в результатах работы системы ARTIST.

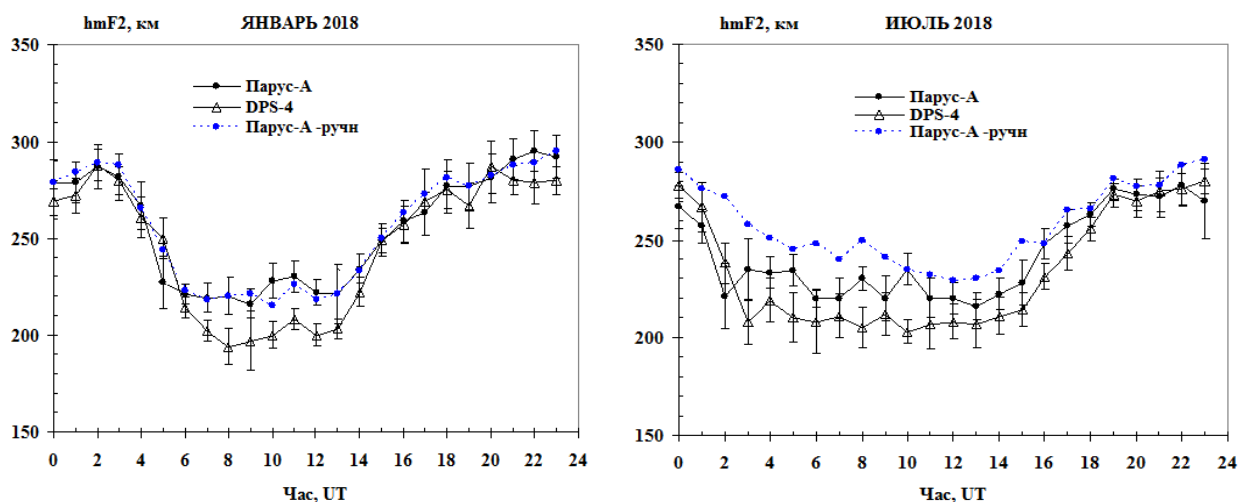


Рис. 1. Суточная медианная зависимость высоты максимума слоя F2 ионосферы в автоматических (AutoScala и ARTIST) системах масштабирования и при ручной (операторской) обработке ионограмм.

1. 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.
2. Krashenninnikov I., Pezzopane M., Scotto C. Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde // Computer & Geosciences. V 36. P. 628-635. 2010.
3. Reinisch B.W., Huang X. Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms. Processing of bottomside ionograms // Radio Sci.. V.18. P. 477-492. 1983.
4. Titheridge J.E. The real height of ionograms: a generalized formulating // Radio Science. V. 23. No. 5. P. 831-849. 1988.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ИНДЕКСОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГОДЫ

Гуляева Т.Л.(1), Хараламбус Х.(2), Пустовалова Л.В.(1)

¹ИЗМИ РАН, г. Москва, Россия, gulyaeva@izmiran.ru

²Frederick Research Center, Nicosia, Cyprus

Выполнен анализ изменений W-индекса ионосферной погоды во время геомагнитных бурь с 2000 по 2017 гг по глобальным картам полного электронного содержания JPL GIM-TEC с плотной сеткой узлов в $1^\circ \times 1^\circ$ по широте и долготе и 15 мин скважностью по времени. W-индекс ионосферной погоды в каждом локальном узле карты означает линейную шкалу от -4 до +4 у.е. (условных единиц) с шагом 1, характеризующую логарифмические отклонения мгновенного значения TEC от скользящей спокойной медианы. Значения W в пределах ± 1 относятся к спокойному состоянию ионосферы, $W = \pm 2$ – возмущения в виде прироста или уменьшения активности, $W = \pm 3$ умеренную бурю, $W = \pm 4$ – интенсивную бурю. Локальные изменения TEC исследованы вдоль цепочки 8 станций приема сигналов навигационных спутников GNSS вдоль «Кипрского» меридиана, точнее – на долготах от 20°E до 52°E и широтах в пределах $\pm 70^\circ$. Показано появление положительных ионосферных бурь, в 58% случаев опережающих на 1 – 6 часов начало бури кольцевого тока по параметру Dst, в то время как отрицательные бури во всех случаях запаздывают на 1 – 6 часов после главной фазы бури Dst.

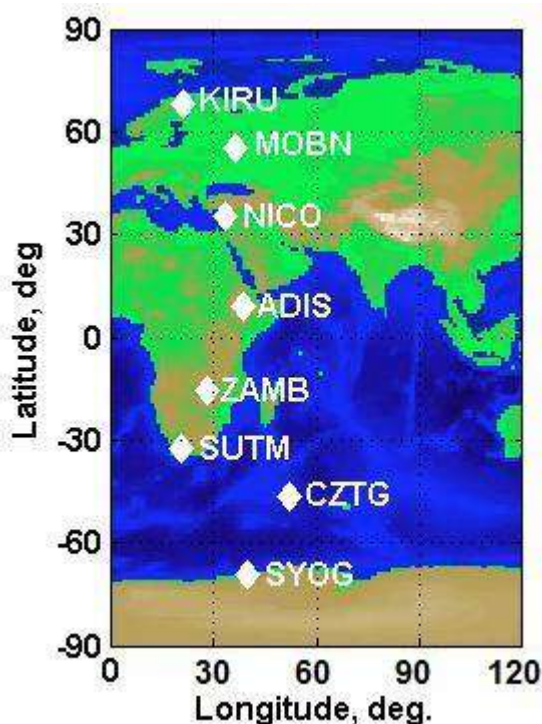


Рис. 1. Расположение станций GNSS вдоль «Кипрского меридиана»

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).

ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ "ПУЗЫРИ" И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ВЛИЯНИЕ ЗОНАЛЬНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДРЕЙФА

Сидорова Л.Н.

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

Известно, что экваториальные плазменные "пузыри", формирующиеся на высотах основания F -области, при подъеме на бóльшие высоты испытывают влияние зонального плазменного дрейфа. Под влиянием дрейфа они перемещаются на восток. С другой стороны, плазменный "пузырь", "растянутый" вдоль магнитной силовой трубки, повторяет ее пространственный ход. Например, изменение магнитного склонения силовой трубки будет отражаться на изменении его долготной ориентации. В регионах с восточным магнитным склонением "пузыри" испытывают сдвиг в восточном направлении, а в регионах с западным магнитным склонением – в западном.

На примерах долготных распределений экваториальных плазменных "пузырей", рассчитанных для зимнего и весеннего периодов, исследован характер влияния указанных факторов. Для этого привлечены данные спутников ISS-b, AE-E, OGO-6, ROCSAT-1 и Hinotori, полученные в годы высокой солнечной активности на разных орбитальных высотах. Выявлено, что "пузыри", регистрируемые на высотах ~ 1100 км в полосе широт 0° – 50° DIPLAT, следуют ходу магнитного склонения силовой трубки, практически "не чувствуя" влияния зонального плазменного дрейфа. Выявлено, что "пузыри", регистрируемые на высотах ~ 300 – 700 км и широтах $\pm 20^\circ$ DIPLAT, подвержены сильному влиянию восточного зонального дрейфа. Магнитное склонение лишь контролирует величину их восточного сдвига.

РОЛЬ ИОНОСФЕРЫ В АСИММЕТРИИ ЗИМА/ЛЕТО В ВЫСЫПАНИЯХ АВРОРАЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Деминов М.Г.

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

На основе статистического анализа данных метеорологических спутников было установлено, что потоки ускоренных электронов, вызывающих дискретные сияния, возникают главным образом в темноте: зимнее полушарие предпочтительнее летнего и ночь благоприятнее дня [1]. Увеличение потоков таких ускоренных электронов в основном связано с увеличением их энергии, а не концентрации [2]. Поэтому появление потоков ускоренных электронов связывают с продольным электрическим полем, которое возникает в относительно узком слое на высотах порядка $1R_E$ вдоль геомагнитного поля, где R_E – радиус Земли.

Тем не менее, оставался неясным вопрос о причинах большой разницы в частоте появления ускоренных электронов в авроральной области в предполуденном секторе для зимних и летних условий. Дело в том, что для этих условий обычно концентрация электронов, например, на высоте 500 км отличается не больше, чем в 2 раза, и выше примерно $3R_E$ вдоль геомагнитного поля разница между летними и зимними значениями также незначительна. Решение этой задачи было главной целью данной работы.

На основе простой численной модели изменения концентрации электронов n_e во внешней ионосфере вдоль геомагнитного поля и известной модели для температур электронов T_e и ионов T_i установлено, что для типичных средних условий в авроральной области в предполуденном секторе:

1. Критическое значение продольного тока альвеновской волны J_C для развития электростатической ионно-циклотронной неустойчивости на высотах порядка радиуса Земли для зимы почти совпадает с верхним пределом средних значений стационарного крупномасштабного продольного тока. Поэтому для зимы достаточно слабых флуктуаций продольного тока, связанных с альвеновской волной, для развития комплекса процессов, приводящих к появлению ускоренных электронов, с которыми связаны дискретные полярные сияния. Для лета значение J_C в 4-5 раз больше, чем для зимы, и стимулированное высыпание авроральных электронов, по-видимому, возможно только при высокой геомагнитной активности.
2. Основная причина разницы в частоте появления ускоренных электронов для зимних и летних условий связана с особенностями изменения параметров внешней ионосферы вдоль геомагнитного поля. Разница в концентрации электронов достигает максимума на высотах около одного радиуса Земли, где летние значения этой концентрации больше зимних в 5-6 раз, что, в свою очередь, связано с более высокими летними значениями температур электронов и ионов.

1. Newell P.T., Meng C.-I., Lyons K.M. Suppression of discrete aurorae by sunlight // Nature. 1996. V. 381. Issue 6585. P. 766-767.
2. Newell P.T., Sotirelis T., Wing S. Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora // J. Geophys. Res. 2010. V. 115, A03216, doi:10.1029/2009JA014805.

СКОРОСТЬ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДВИЖЕНИЙ И ВЫСОТА ТУРБОПАУЗЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ИПН

Жемяков И.Н., Бахметьева Н.В., Виноградов Г.Р., Калинина Е.Е.

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, ilia.zhem@yandex.ru

В работе представлены результаты исследования турбулентной составляющей атмосферной динамики. Обоснован метод определения уровня турбопаузы – высоты, на которой турбулентное перемешивание нейтральных компонент мезотермосферы сменяется диффузионным разделением газов. Метод основан на анализе высотной зависимости времени релаксации сигнала, рассеянного искусственными периодическими неоднородностями (ИПН) ионосферной плазмы, создаваемыми мощным высокочастотным радиоизлучением [1]. Уровень турбопаузы определяется как высота, ниже которой происходит отклонение высотной зависимости времени релаксации от диффузионного закона, определяющего исчезновение неоднородностей после окончания воздействия на ионосферу [2]. В области перехода от диффузионного разделения газов к турбулентному перемешиванию (ниже уровня турбопаузы) время релаксации неоднородностей перестает подчиняться диффузионному закону и определяется турбулентной диффузией, что позволяет определить скорость турбулентного движения. В турбулентной области неоднородности разрушаются (релаксируют) быстрее, чем под действием амбиполярной диффузии. Скорость турбулентного движения плазмы и нейтральной компоненты является функцией диффузионного времени и измеренного времени релаксации рассеянного сигнала. Проанализированы высотно-временные вариации уровня турбопаузы по результатам измерений на нагревном стенде СУРА (56,15 N; 46,11 E) параметров сигнала, рассеянного ИПН, в сентябре-октябре 2007, 2010 и 2014 гг., а также в августе-октябре 2015–2018 гг. Получено, что уровень турбопаузы в летние и осенние месяцы изменялся в интервале высот 88–108 км. Наиболее часто минимальный уровень турбопаузы находился на высоте 90–91 км, а максимальный – на высоте 104–106 км. Временные вариации уровня турбопаузы характеризуются квазипериодичностью с периодом от 10–15 минут до нескольких часов, что может быть обусловлено влиянием внутренних гравитационных волн на состояние ионосферы и нейтральной среды.

По результатам экспериментов 2015–2019 гг. скорость турбулентного движения определена в интервале высот 80–105 км, то есть ниже уровня турбопаузы. Максимальное значение турбулентной скорости достигало 5–6 м/с, что сопоставимо с величиной скорости вертикального регулярного движения плазмы. Скорости регулярных и турбулентных движений легко разделить по «хаотичному» в последнем случае характеру изменения фазы рассеянного сигнала [1]. Вертикальная компонента скорости регулярного движения испытывала значительные вариации по высоте и во времени, наиболее выраженные в области D, с переменным направлением движения. Усредненные по пятиминутному интервалу значения вертикальной скорости плазмы достигали 6 м/с в области D (66–85 км) и 3,0–3,5 м/с в области E (90–112 км). Наблюдались волнообразные вариации скорости с постоянной сменой направления и периодом от 5–10 минут до часа в области D и до 3 часов в области E, что свидетельствует о развитой волновой динамике области турбопаузы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту № 18-05-00293.

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. Special Issue "Atmospheric Acoustic-Gravity Waves". 2019. V. 10(8). P. 450.

МОДУЛЯЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ДНЕВНЫХ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ ПИВ НА ИОНОГРАММАХ

Акчурин А.Д., Смирнов Г.С., Ильдиряков В.Р.

К(П)ФУ, г. Казань, Россия, adel.akchurin@kpfu.ru

У исследователей слабых среднеширотных перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) в настоящий момент нет иного доступного инструмента кроме ионозондов, чья высокая чувствительность ($dN/N > 3\%$) обеспечивается полным отражением радиоволн декаметрового диапазона. Остальные активно применяемые в средних широтах методы зондирования ионосферы значительно проигрывают зондированию декаметровыми радиоволнами. Так в широко используемых ныне данных ПЭС на густой сетке ГНСС-приемников с трудом удалось приблизиться к $dN/N \sim 10\%$ при обнаружении среднемасштабных ПИВ (СМ ПИВ) на картах возмущений ПЭС. Это удалось лишь при тщательном отборе зрительных осей (line-of-sight), проходящих между приемником и спутником ГНСС [1, 2]. Мелкомасштабные ПИВ (ММ ПИВ), чьи горизонтальные размеры менее 100 км, обычно имеют небольшую интенсивность ($dN/N < 10\%$), что делает их практически не видимыми для всех дистанционных методов, работающих на частотах, значительно выше критических частот среднеширотной ионосферы. Исключение составляют дорогостоящие радары некогерентного рассеяния, работающие на плазменной линии и, по сути, отсутствующие в средних широтах. В силу такой фактической малонаблюдаемости ММ ПИВ их ионозондовые измерения являются очень важными.

На ионограммах вертикального зондирования сигнатуры 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, вблизи критической частоты, то для ММ ПИВ – это появление дополнительных следов серповидной или клювообразной формы (в англоязычной терминологии cusp и hooks, соответственно) и опять же, вблизи критической частоты [3]. В силу большой вариативности сигнатур ММ ПИВ на ионограммах и их малого времени присутствия (5-8 минут) для обнаружения ММ ПИВ 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 одномоментных ионограмм [4, 5].

Анализ осенних ионограмм позволил установить в суточных вариациях интенсивности ММ ПИВ наличие примерно 2-х часовых периодов повышенной и пониженной интенсивности (или присутствие модуляции интенсивности ММ ПИВ).

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

1. Шерстюков Р.О., Акчурин А.Д. // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки, 2018 Т. **160**. С.603.
2. Sherstyukov R.O., Akchurin A.D., Sherstyukov O.N. // Adv. Space Res. 2018. V. **61**. P. 1717-1725. doi: 10.1016/j.asr.2017.11.026.
3. Akchurin A.D., Bochkarev V.V., Ildiryakov V.R., Usupov K.M. // Proc. of 30th URSI GASS 2011. Art. 6050965. doi: 10.1109/URSIGASS.2011.6050965.
4. Akchurin A., Smirnov G. // Proc. of 32nd URSI GASS 2017. Art. 8105046. doi: 10.23919/URSIGASS.2017.8105046.
5. 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.

**НАБЛЮДЕНИЕ СИГНАЛОВ РАКУРСНОГО РАССЕЯНИЯ
РАДИОВОЛН РАДАРНОМ УКВ ДИАПАЗОНА В РАЗЛИЧНЫХ
ГЕОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Тютин И.В., Куряков И.В.

ОАО «НПК «НИИДАР», г. Москва, Россия, tyutin@physics.msu.ru

"Отражения" ультракоротковолновых радиоволн от авроральной ионосферы, например, ракурсное рассеяние радиоволн (RRP), известно и изучается уже около 80 лет. Это явление связано с сильным анизотропным рассеянием радиоволн на полеориентированных флуктуациях концентрации плазмы, известных как неоднородности аврорального E-слоя ионосферы. Последние создают сильные и обширные помехи для радаров УКВ диапазона. Экспериментальные данные по регистрации анизотропного рассеяния на ионосферных неоднородностях слоя E, полученные на радаров 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 RRP регистрировались радаром УКВ диапазона в Красноярском крае с северной ориентацией сектора обзора.

ВЫСЫПАНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ В МАГНИТОСОПРЯЖЕННОЙ ОТНОСИТЕЛЬНО СТЕНДА СУРА ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Рябов А.О., Фролов В.Л.

НИРФИ ННГУ, Нижний Новгород, Россия

В экспериментах, связанных с магнитосопряженной областью (МСО) относительно области, возмущенной стендом СУРА, были зафиксированы случаи генерации искусственных высыпаний энергичных электронов в ионосферу, которые появлялись через 25 – 30 мин после включения ВН. Величина потоков энергичных электронов с $E \geq 100$ кэВ в среднем составляет $F \approx 20-100$ эл/(см²·с·стер·кэВ), что в несколько раз превосходит значения этих величин в естественных условиях. Область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 2200 км с юга на север; размер области высыпаний в ортогональном к меридиану направлении может составлять до 500 км. В сравнении с высыпаниями в возмущенной области в случаях высыпаний в МСО значения энергии и потоков имеют больший разброс, что объясняется непредсказуемостью стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли в МСО. Интересным представляется, что значения энергии и потоков в наиболее результативные сеансы превосходят случаи высыпаний над стендом.

На основании проведенных экспериментов можно сформулировать критерии искусственного характера высыпаний высокоэнергичных электронов в МСО из радиационного пояса Земли, вызванного стимуляцией ионосферы мощными КВ радиоволнами. Итак, эти критерии:

- а) энергия выпадающих электронов составляет $E \geq 250$ кэВ, а потоки $F \geq 10$, даже в случаях относительно спокойных геомагнитных условий;
- б) максимум интенсивности высыпаний наблюдается в центре МСО, то есть внутри возмущенной магнитной силовой трубки;
- в) наблюдается характерный провал высыпаний между авроральной областью и центром МСО (~ от 46° до 53° южной широты);
- г) высыпания наблюдаются, когда эффективная мощность излучения ВН превышает 40 МВт и имеет место эффективное взаимодействие мощной радиоволны с плазмой F_2 -слоя ионосферы.

Исследования выполнялись при поддержке РФФИ (гранты № 20-05-00166 А и № 19-52-15007 НЦНИ_а).

ЛЕНГМЮРОВСКАЯ И ИОННО-АКУСТИЧЕСКАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ, ВЫЗВАННАЯ ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНЫХ КВ РАДИОВОЛН НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Калишин А.С., Хаггстром И.

ААНИИ Росгидромет, г. Санкт Петербург, Россия, nataly@aari.nw.ru

Использование радара некогерентного рассеяния радиоволн, расположенного в непосредственной близости от КВ нагревного стенда, обеспечивает детальные исследования продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических), которые непосредственно регистрируются в спектре радара как усиленные нагревом плазменные и ионные линии (HF-enhanced plasma and ion lines, HFPLs и HFILs). Представлены результаты экспериментальных исследований динамики развития во времени HFPLs и HFILs после включения нагревного стенда, а также порогов их возбуждения в высокоширотной F-области ионосферы при альтернативном нагреве мощной КВ радиоволной обыкновенной (О-мода) и необыкновенной (Х-мода) поляризациями.

Результаты базируются на экспериментах, выполненных на КВ нагревном стенде EISCAT/Heating в г. Тромсе, северная Норвегия (69.6°N, 19.2°E). Альтернативный О/Х нагрев производился в направлении магнитного зенита на частотах в диапазоне $f_H = 5.4 - 8$ МГц циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза при максимальной эффективной мощности излучения Рэфф = 456 - 715 МВт. В период экспериментов частота нагрева была близка к критической частоте foF2 ($f_H / foF2 = 0.92 - 0.95$) что обеспечивало возможность возбуждения нелинейных явлений как при О-, так и Х-поляризации мощной КВ радиоволны. Измерения плазменных и ионных линий выполнялись с помощью EISCAT радара некогерентного рассеяния радиоволн (931 МГц) в Тромсе.

Было обнаружено принципиальное различие в развитии искусственных ленгмюровской и ионно-акустической турбулентностей после включения КВ нагревного стенда. При О-нагреве включение нагревного стенда сопровождалось резким возрастанием HFPLs и HFILs, которые по данным радара некогерентного рассеяния радиоволн регистрировались уже на первом 5 с шаге измерений, что является классическим проявлением параметрической распадной неустойчивости (parametric decay instability, PDI). Затем развиваются мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН), которые препятствуют дальнейшему развитию PDI. Однако при высоких мощностях излучения (Рэфф > 220 – 250 МВт) возможно повторное появление HFPLs и HFILs, которые возбуждаются непрерывно в течение цикла нагрева. При Х-нагреве плазменные и ионные линии развивались с задержкой после начала нагрева на 15 – 30 с. После появления их интенсивность постепенно возрастала, достигая насыщения примерно через 1 мин, когда МИИН уже полностью сформированы. Пороговые мощности их возбуждения составляли порядка 150 МВт, что меньше мощностей возбуждения непрерывных HFPLs и HFILs при О-нагреве. При этом интенсивность HFPLs и HFILs при Х-нагреве была на два порядка выше по сравнению с О-нагревом. Выполнен анализ полученных экспериментальных данных. Предполагается, что на генерацию ленгмюровской и ионно-акустической турбулентностей при Х-нагреве, значительно превосходящей по интенсивности эффект при О-нагреве, могут влиять такие процессы как ускорение электронов в широком диапазоне высот, гидирование Х-волны вдоль магнитного поля и отсутствие аномального ослабления.

О ВОЗМОЖНОМ МЕХАНИЗМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВОЛНОЙ НАКАЧКИ Х-ПОЛЯРИЗАЦИИ

¹Греч С. М., ¹Яшнов В. А., ²Благовещенская Н. Ф.

¹ННГУ, г. Нижний Новгород, sgrach@rfg.unn.ru, ²ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия

Эксперименты на нагревном комплексе EISCAT/Heating в 2009 – 2016 гг. убедительно продемонстрировали, что мощная КВ радиоволна необыкновенной (Х-) поляризации, инжектируемая в высокоширотную F-область ионосферы вызывает генерацию разнообразных искусственных ионосферных возмущений, которые могут превосходить по интенсивности возмущения при воздействии обыкновенной (О-) волной, в том числе ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности, а также оптического свечения [1,2]. Этот результат оказался достаточно удивительным, поскольку Х-волна при излучении с Земли отражается заметно ниже области плазменного резонанса, где могут существовать плазменные (ленгмюровские) волны, ответственные, в свою очередь, за ускорение электронов и, следовательно, за генерацию оптического свечения. Отметим сразу ряд особенностей наблюдаемых эффектов. Во-первых, они наблюдаются только когда центральный луч диаграммы направленности передающей антенны комплекса EISCAT/Heating направлен вдоль магнитного поля Земли $\mathbf{B}_0$ (в магнитный зенит), также, как и радар некогерентного рассеяния EISCAT частоте 930 МГц, регистрирующий рассеяние на плазменных (ленгмюровских) и ионно-акустических волнах. Во вторых, в экспериментах использовалась достаточно высокая эффективная мощность $P_{\text{эф}} = 460 - 750 \text{ МВт}$. В третьих, время развития наблюдаемых эффектов при Х-нагреве существенно превышало время развития для О-воздействия и составляло от 15 с до минуты.

В настоящем докладе предлагается цепочка процессов, которая при условиях экспериментов [1,2] может обеспечить существование наблюдаемых эффектов при Х-воздействии. Это, во-первых, самофокусировка волны накачки Х-поляризации, которая не сопровождается возбуждением плазменных волн и, следовательно, к турбулентному перемешиванию различных возмущений, но может приводить к созданию каналов электронной концентрации, вытянутых вдоль $\mathbf{B}_0$. Такие каналы могут а) захватывать волну накачки, и б) в случае, если они достаточно глубокие, $\Delta n/n > f_c/f_0$, (n – электронная концентрация, f_c – циклотронная частота, f_0 – частота волны накачки) обеспечивать ее проникновение на большие высоты, где фоновая плазма (вне канала) для Х-волны непрозрачна, а О-волна на этой же частоте может существовать. Далее, если стенка канала достаточно резкая, то захваченная Х-волна может, в результате линейной трансформации, возбуждать О-моду на той же частоте, но уже вне канала. И, наконец, если эффективность такой трансформации достаточно высока, то О-мода может возбуждать уже ленгмюровскую турбулентность в результате развития параметрических неустойчивостей.

Каждое из звеньев этой цепочки требует, естественно, детального рассмотрения и доказательства. К настоящему времени нами рассмотрена только задача о возбуждении О-моды вблизи резкой стенки канала в зависимости от угла падения на нее Х-волны. Установлено, что коэффициент трансформации может достигать 10%, при этом амплитуда О-волны может превышать порог возбуждения ленгмюровских волн.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00622.

1. Blagoveshchenskaya N. F. et al.// J.Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 10483.
2. Blagoveshchenskaya N. F., et al.// J.Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2015. V. 135. P. 50.

ЭФФЕКТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ОДНОВРЕМЕННО НА ВЫСОТАХ НИЖЕ И ВЫШЕ МАКСИМУМА F2-СЛОЯ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА НАГРЕВНОМ СТЕНДЕ EISCAT/HEATING

Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С., Хаггстром И.

АНИИИ, г. Санкт-Петербург, Россия borisova@aari.ru

Представлены результаты экспериментальных исследований особенностей генерации и характеристик ленгмюровской и ионно-акустической турбулентности в F-области высокоширотной ионосферы, возбуждаемой мощными короткими радиоволнами обыкновенной поляризации, излучаемыми нагревным комплексом EISCAT/Heating (Тромсе, Норвегия) в направлении магнитного поля Земли. Эксперимент проводился на частотах нагрева f_H близких к четвертой гармонике гирочастоты электронов, $f_H < 4 \cdot f_{ce}$, и критической частоте слоя F2, f_0F2 , $f_H < f_0F2 < f_H + f_{ce}/2$, где f_{ce} – гирочастота электронов. По данным радара некогерентного рассеяния радиоволн EISCAT (930 МГц) выполнен совместный анализ спектров ионных и плазменных линий одновременно ниже и выше высоты максимума F2-слоя.

Впервые обнаружено возбуждение усиленных нагревом ионных линий и инициированных нагревом плазменных линий на частоте, смещенной от частоты накачки в сторону увеличения на 0.35-0.45 МГц, одновременно на высоте отражения волны накачки и на высоте выше высоты максимума F2-слоя на 10 – 50 км и высоты отражения на 25 – 70 км. На высоте отражения частота мощной радиоволны f_H была ниже четвертой гармоники гирочастоты электронов, $f_H < 4f_{ce}$ на 0.020 – 0.030 МГц. В спектрах мощности ионных линий S_{IL} наблюдались три спектральных максимума S_{IL} : смещенные по частоте относительно нуля на ~ 10 кГц в отрицательную S_{ILD} и положительную S_{ILU} области, и несмещенный максимум на нулевой частоте S_{IL0} одновременно на высотах как ниже, так и выше максимума слоя F2. Мощности спектральных максимумов S_{IL} превышали фоновые значения в 2–5 раза на высотах ниже максимума слоя F2 и в 2–3 раза на высотах – выше максимума. Усиление максимумов S_{ILD} и S_{ILU} указывает на возбуждение периодической стрикционной неустойчивости, наличие несмещенного максимума S_{IL0} свидетельствует о возбуждении аperiodической стрикционной неустойчивости. Следовательно, периодическая и аperiodическая стрикционная неустойчивости развивались одновременно на двух ионосферных высотах.

Рассматриваются возможные механизмы распространения мощной короткой волны O-поляризации от высоты отражения на высоты выше максимума F2 слоя благодаря трансформации падающей волны обыкновенной поляризации (O-мода) в быструю волну необыкновенной поляризации (Z-мода), или распространение в L-моду, которая является волной с левосторонней круговой поляризацией (как O-мода) с волновым вектором, параллельным магнитному полю. На высоте выше максимума F2 слоя, при условии равенства частоты нагрева и локальной частоты плазмы происходит обратный переход Z-(или L-) волны в O-моду. Волна O-моды на высотах выше максимума слоя F2 может вызвать развитие параметрической распадной неустойчивости, следствием которой является генерация усиленных нагревом ионных линий и инициированных нагревом плазменных линий.

ПРОДОЛЬНЫЕ ТОКИ И ПЛАЗМЕННЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ, ИНДУЦИРОВАННЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ НАГРЕВОМ СТЕНДА SURA, ПО НАБЛЮДЕНИЯМ СПУТНИКОВ SWARM НА ВЫСОТАХ 400- 500 КМ

Лукьянова Р.Ю.¹, Фролов В.Л.² Рябов А.О.²

1) ИКИ РАН, г. Москва, Россия, *r.lukianova@gcras.ru*

2) НИРФИ ННГУ им. Н.И.Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты серии координированных экспериментов по модификации ионосферной плазмы в F2-слое среднеширотной ионосферы с помощью нагревного стенда СУРА во время пролетов через нагретую область спутников SWARM. Нагрев осуществлялся мощными КВ радиоволнами О-поляризации при частоте волны накачки 4.3–4.8 МГц и эффективной мощности излучения от 20 до 100 МВт. Группировка низкоорбитальных (высота ~450 км) полярных спутников SWARM состоит из трех идентичных аппаратов. Два спутника летят парой по почти параллельным траекториям на расстоянии 90 км друг от друга, а орбита третьего лежит в другой долготной плоскости. Плоскости орбит постепенно смещаются с увеличением угла долготного разделения на 20° в год. Каждый из космических аппаратов оснащен высокоточным векторным магнитометром и ленгмюровским зондом для определения параметров плазмы. Магнитометры SWARM способны детектировать магнитные вариации, которые генерируются продольными токами (ПТ), текущими вдоль силовых линий геомагнитного поля. Решение обратной задачи позволяет оценить амплитуды и пространственную структуру ПТ, время их развития и релаксации, определить связь ПТ с термодиффузионными процессами в плазме и генерацией различных компонент искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ). Анализ наблюдений в ходе координированных экспериментов СУРА-SWARM показывает, что в нагретой области происходит локализованное повышение электронной температуры, сопровождаемое стратификацией электронной плотности, а также развивается локальная система ПТ. Магнитные вариации указывают, что ПТ интенсивностью ~0.05 $\mu\text{A}/\text{m}^2$ направлены в центре возмущенной области из ионосферы и на флангах - в ионосферу. На необходимость возбуждения токов в возмущенной области ионосферы при развитии ИИТ указывалось в теоретических работах, также подобные эффекты были обнаружены в лабораторном эксперименте. Однако прямые измерения их величин и характеристик в космосе были выполнены впервые. Наблюдаемая SWARM токовая система связана с униполярной диффузией в магнитоактивной плазме и возбуждением вихревых электрических токов в ионосфере.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 20-05-00166.

Lukianova R., Frolov V., Ryabov A. // GRL, 46, doi:10.1029/2019GL085833. 2019.

НИЖНЯЯ ИОНОСФЕРА ЗЕМЛИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ

Бахметьева Н.В.¹, Куликов Ю.Ю.², Вяхирев В.Д.¹, Жемяков И.Н.¹, Калинина Е.Е.¹

¹НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, nv_bakhm@nirfi.unn.ru

²Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Работа посвящена обсуждению разных аспектов исследований нижней ионосферы Земли с помощью диагностических средств, находящихся на нагревном стенде СУРА (56,15 N; 46,11 E). Представлены результаты исследования D-области (60–90 км) методом частичных отражений, основанным на рассеянии радиоволн естественными плазменными неоднородностями. Обсуждаются вариации высотного профиля электронной концентрации $N(h)$, полученного методом дифференциального поглощения [1]. Приведены результаты изменения $N(h)$ -профиля, вызванные воздействием на ионосферу, с уменьшением электронной концентрации во время нагрева.

Представлены результаты измерения скорости вертикального движения плазмы, в нижней ионосфере равной скорости нейтральной компоненты, методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы в D- и E-областях (90–130 км). Метод предполагает создание ИПН путем вертикального воздействия на ионосферу мощным КВ радиоизлучением, зондирование неоднородностей пробными радиоволнами, измерение амплитуды и фазы рассеянного ими сигнала [2]. Обсуждаются высотно-временные вариации скорости вертикального движения, в том числе, в периоды существования развитых спорадических слоев, регулярно наблюдаемые квазипериодические вариации скорости по высоте и во времени.

Представлены результаты последних экспериментов (2018, 2019 гг.) по исследованию изменения спектра излучения атмосферы в линии озона на мезосферных высотах при возмущении нижней ионосферы излучением стенда СУРА с одновременной диагностикой состояния ионосферы методом ИПН. Подтверждено уменьшение содержания мезосферного озона, коррелирующее с периодом воздействия на ионосферу [3]. Одновременно наблюдалось заметное возмущение нижней ионосферы, которое проявлялось в изменении параметров плазмы и нейтральной компоненты, определенных методом ИПН [2,3]. Обсуждается существенное влияние ионосферных условий, в том числе, перемещающихся ионосферных возмущений и спорадических слоев ионизации на результаты микроволновых наблюдений мезосферного озона.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проектам № 18-05-00293 (проведение экспериментов и диагностика ионосферы методом ИПН) и № 18-45-520009 (микроволновые наблюдения мезосферного озона).

1. Belrose J.S., Burke M.J. // J.Geophys. Res. 1964. V. **69**. P. 2799.

2. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью ИПН – Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999. 156 с.

3. Andrianov A.F., Bakhmet'eva N.V., Vyakhirev V.D., Kalinina E.E., A.A. Krasilnikov, Kulikov Yu.Yu. // Radiophysics and Quantum Electronics. 2019. V. **62**. No 5. P. 326.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПЛАЗМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗОНДОВ ЛЕНГМЮРА В АКТИВНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ СУРА-НОРСАТ

Чернышов А.А.¹, Чугунин Д.В.¹, Могилевский М.М.¹, Фролов В.Л.², Милош В.³, Клаусен Л.³

¹Институт космических исследований Российской академии наук, г. Москва, Россия, achernyshov@iki.rssi.ru

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

³Университет города Осло, Норвегия

В этой работе мы приводим первые результаты, полученные в ходе совместных экспериментов Сура-Норсат, когда во время работы российского нагревного стенда Сура были пролеты норвежского спутника Норсат-1. Уникальность этих экспериментов заключается в том, что спутник два раза прошел очень близко к центру пятна нагрева, а зонды Ленгмюра, установленные на спутнике Норсат-1, позволяют обеспечить достаточно высокое разрешение до 1 кГц. Кроме того, эксперименты проводились в утреннее время, что является наиболее благоприятным периодом для исследования искусственных плазменных неоднородностей, поскольку дневная ионосфера характеризуется более высоким уровнем фотоэлектронов, меньшей высотой максимума слоя F2 и более высокой плотностью плазмы и нейтральных частиц в ионосфере. Представленные активные эксперименты по программе Сура-Норсат проводились в спокойных геомагнитных условиях, что позволяет более точно оценить влияние искусственного нагрева на среднеширотную ионосферу.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (№ 19-52-15007)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИСКУССТВЕННОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА НАГРЕВНОМ СТЕНДЕ АРЕСИБО С ПОМОЩЬЮ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Шиндин А.В., Хашев В.Р., Сергеев Е.Н., Грач С.М.

ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия, shindin@rf.unn.ru

В докладе представлены предварительные результаты исследований искусственной ионосферной турбулентности на низкоширотном нагревном стенде в обсерватории Аресибо (Пуэрто-Рико, США) 7-8 ноября 2018 г. с помощью радара некогерентного рассеяния. Одновременно проводились измерения искусственного радиоизлучения ионосферы, результаты которых доложены в [1]. Воздействие на ионосферу осуществлялось мощной радиоволной обыкновенной (О) поляризации вертикально вверх на частоте $f_{\text{ВН}}=5095$ кГц при различных режимах излучения: 1) короткие импульсы с большой скважностью ($\tau_{\text{и}} = 5-100$ мс, $T_{\text{и}} = 2-20$ с) для исследования лентмюровской турбулентности и 2) квазинепрерывный нагрев ($\tau_{\text{и}} = 165$ мс, $T_{\text{и}} = 200$ мс) с длительностью посылок 1-150 с и одновременным зондированием диагностическими импульсами (см. [1]) для исследования перехода к верхнегибридной турбулентности.

Радар некогерентного рассеяния излучал импульсы длительностью 440 мкс с периодом следования 10 мс на частоте $f_{\text{Р}} = 430$ МГц. Задержки этих импульсов относительно включения волны накачки (ВН) варьировались от 2,2 мс до 7,8 мс для исследования рассеянного сигнала на плазменной турбулентности на разных стадиях развития.

В результате проведенного спектрального анализа рассеянных сигналов с последующим усреднением данных были получены профили электронной концентрации и спектры искусственной плазменной линии (сигналов, рассеянных на плазменных волнах) с пространственным разрешением 300 м. Для режимов излучения коротких импульсов ВН (5-50 мс) построены спектры рассеянного сигнала относительно центральных частот $f_{\pm} = f_{\text{Р}} \pm f_{\text{ВН}}$ для сдвинутых вниз (–) и вверх (+) по отношению к $f_{\text{Р}}$ плазменных линий. При этом отстройка $\Delta f_{\pm}$ частоты f рассеянного сигнала от центральной частоты $\Delta f_{\pm} = f - f_{\pm}$ соответствует отстройке частоты плазменной волны $f_{\text{ПЛ}}$ от $f_{\text{ВН}}$: $-\Delta f_{\text{ПЛ}} = f_{\text{ВН}} - f_{\text{ПЛ}} = \pm \Delta f_{\pm}$. Установлено следующее.

1. Максимальная интенсивность в спектре плазменных волн наблюдается на нулевых отстройках от $f_{\text{ВН}}$ ко 2-6-й мс воздействия, а сами спектры имеют форму типа «continuum» в области отрицательных отстроек $\Delta f_{\text{ПЛ}} < 0$. С увеличением длительности нагрева до 12 мс для плазменной линии начинают наблюдаться спектры распадного типа с выраженными максимумами интенсивности (сателлитами) на отстройках от -2,5 кГц до -12 кГц.

2. Сопоставление интегральной интенсивности плазменной линии для 10 и 50 мс импульса ВН с интенсивностью плазменных волн на 2,2 мс после выключения ВН позволило определить их времена релаксации $\tau_{\text{рел}}$. Для 10 мс импульса $\tau_{\text{рел}}$ составило 2 мс, для 50 мс импульса $\tau_{\text{рел}}$ уменьшилось до 0,5 мс. Это свидетельствует о росте декремента затухания плазменных волн в 4 раза с ростом длительности импульса воздействия.

3. Интервал высот, занимаемый областью генерации плазменных волн возрастает от 1 км для 5-10 мс воздействия до 2,5 км для 50 мс воздействия. Для длинного (~2,5 мин.) нагрева наблюдается еще большее расширение высотной области генерации плазменных волн до 5-7,5 км (до 15 км при воздействии вблизи критической частоты слоя F2) и ее стратификация.

4. Проведено сопоставление результатов измерений искусственной плазменной линии с наблюдениями искусственного радиоизлучения ионосферы.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-32-70198).

1. Грач С.М., Шиндин А.В., Сергеев Е.Н. Четырнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе. 11-15 февраля 2019. ИКИ РАН. Тезисы докладов. Стр. 108.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ПЛАЗМУ НА ЛАЗЕРНО-ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ PEARL (ИПФ РАН)

Стародубцев М.В., Соловьев А.А., Бурдонов К.Ф.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mstar@ipfran.ru

Актуальность исследования процессов взаимодействия высокоскоростных плазменных потоков с внешним магнитным полем обусловлена целым рядом важных задач астрофизики и околоземной плазмы. Методы лабораторного моделирования подобных плазменных процессов с помощью плотных абляционных потоков вещества, создаваемых при облучении твердотельных мишеней мощным лазерным излучением, позволяют детально проанализировать различные особенности взаимодействия плазмы с магнитным полем. Новый подход, разработанный в течение последних лет и использованный на лазерно-плазменном стенде PEARL (ИПФ РАН), основан на использовании экстремально сильных магнитных полей (напряженностью порядка десятков тесла), что позволяет использовать широкий спектр лазерных методов диагностики параметров плазмы (интерферометрия, поляриметрия, шадоуграфия и пр.), обладающих исключительно высоким пространственным и временным разрешением и обеспечивающих возможность детального изучения динамики взаимодействия лазерной плазмы с магнитными полями [1-4].

В докладе будут представлены последние результаты экспериментов, демонстрирующие структуру и динамику разлета лазерной плазмы во внешнее магнитное поле, в том числе формирование диамагнитных плазменных каверн [1,2], возбуждение мелкомасштабных структурных и низкочастотных дрейфовых неустойчивостей, определяющих режимы взаимодействия плазменного потока с магнитным полем [4]. В частности, будет проанализирована динамика разлета плазмы в зависимости от начальной геометрии плазменного потока и от интенсивности лазерного излучения на поверхности мишени.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 18-02-00850-а и № 18-29-21018-мк).

1. B. Albertazzi et al. Science. 346, 6207:325-8 (2014).
2. D. P. Higginson et al. Phys. Rev. Lett. 119, 255002 (2017).
3. Е. П. Курбатов и др. Астрономический журнал. 95, 8, 509-518 (2018).
4. B. Khair et al. Phys. Rev. Lett. 123, 205001 (2019).

ЗАХВАТ ЭЦР ВОЛН В КАВЕРНУ С ПОНИЖЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ПЛАЗМЫ, ВЫТЯНУТУЮ ВДОЛЬ ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Галка А.Г., Костров А.В., Малышев М.С.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, galasnn@appl.sci-nnov.ru

Представлены экспериментальные результаты по исследованию особенностей распространения электромагнитных волн в магнитоактивной плазме на частотах вблизи электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР). Эксперименты проводились на крупномасштабном стенде «Ионосфера», подробно описанном в работе [1]. Установлено, что основной поток излучения, возбуждаемого миниатюрными антеннами, из центра плазменного столба на частотах вблизи ЭЦР направлен перпендикулярно внешнему магнитному полю и на границе плазма-вакуум трансформируется в электромагнитную моду. Максимальный выход излучения наблюдается при плазменной частоте порядка 0,3-0,4 от гирочастоты.

В данной работе представлены результаты особенностей распространения ЭЦР волн в плазме, в которой имеется каверна с пониженной плотностью, вытянутая вдоль внешнего магнитного поля. Каверна создавалась с помощью диэлектрической тени, что позволило создать область пониженной плотности $dN/N \sim 0.4$ и шириной порядка 2 см. Показано, что наличие каверны плотности на пути переноса энергии ЭЦР волн приводит к захвату этих волн в канал и распространению вдоль магнитного поля. Проведенные исследования особенностей распространения ЭЦР волн в плазме с каверной плотности позволяют объяснить один из вопросов аврорального километрового излучения Земли, связанный с выходом электромагнитного поля излучения из приземной плазмы с малым углом расходимости вдоль магнитного поля.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, в рамках научных проектов № 18-32-00616мол_а и 18-42-520053р_а.

1. Малышев М.С., Назаров В.В., Костров А.В., Галка А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 2019 Т. 110, №4, С. 237–240

ДИНАМИКА ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ, ИНЖЕКТИРУЕМОЙ ПОПЕРЕК ВНЕШНЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛЬНЫХ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ.

**Коробков С.В., Гущин М.Е., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Николенко А.С.,
Гундорин В.И**

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, korobkov@ipfran.ru

Формирование коллимированных струйных течений плазмы в поперечном магнитном поле – эффект, важный с точки зрения постановки активных экспериментов в ионосфере и магнитосфере Земли. В модельных экспериментах, проводимых на стенде «Крот», исследуется динамика потока плотной низкотемпературной плазмы, инжектированного поперёк внешнего магнитного поля. В качестве источника плазмы используется коаксиальная плазменная пушка эрозионного типа, изготовленная из коаксиальной линии с изоляцией из полиэтилена низкой плотности [1]. Особенностью модельного эксперимента на стенде «Крот» является возможность исследования динамики плазменной струи на трассе длиной до одного метра поперек однородного магнитного поля индукцией до 500 Гс. При этом практически исключается влияние стенок вакуумной камеры на динамику плазменной струи, что приближает условия моделирования к космическим [2]. В ходе экспериментов, наряду с детальными зондовыми измерениями параметров плазмы и возмущений магнитного поля, производится фотосъёмка плазмы камерой с быстрым затвором с нескольких ракурсов. Высокая воспроизводимость параметров плазмы от одного «выстрела» к другому (лучше 10%), с одной стороны, и высокий ресурс пушки, с другой стороны, позволяют детально исследовать пространственную структуру плазмы и магнитных возмущений в их динамике.

Основным результатом выполненных экспериментальных исследований представляется эффект коллимации плазменного потока в поперечном к магнитному полю направлении, обнаруженный на стадии свободного разлёта облака после окончания импульса тока плазменной пушки. Установлено, что плазменная струя при инжекции поперек магнитного поля сжимается в тонкий «лист», толщина которого оказывается порядка гирорадиуса наиболее легких ионов – водорода. Скорость движения плазмы поперек магнитного поля оказывается в 1.5 – 2 раза меньше, чем при разлете без магнитного поля, и в условиях эксперимента составляет величину порядка 15 – 20 км/с. Детальные измерения структуры магнитных возмущений, выполненные магнитными зондами в обширной области пространства, показывают, что при инжекции плазмы формируется диамагнитная каверна, которая, однако, локализована около среза рабочей части пушки, и имеет диаметр на порядок меньший размеров «плазменного листа». В основном объёме «плазменного листа» величина диамагнитных возмущений не превышает 1% от индукции фонового поля. Таким образом, струя движется поперек магнитного поля, практически не изменяя его структуры.

В докладе обсуждаются особенности динамики коллимированной плазменной струи, включая ее поворот в направлении циклотронного вращения ионов, стратификацию плазмы, а также отсутствие заметного влияния фоновой плазмы на динамику струи по сравнению со случаем ее инжекции в вакуум.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-29-21018-мк.

1. Коробков С.В., Гущин М.Е., Гундорин В.И. и др. // Письма в ЖТФ 2019, Т **45**, С. 45
2. Гущин М.Е., Коробков С.В., Терехин В.А. и др. // Письма в ЖЭТФ 2018, Т. **108**, С. 416

ГЕНЕРАЦИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВАРИАЦИЙ В ИОНОСФЕРЕ ВОЛНОЙ ЦУНАМИ

Сорокин В.М., Ященко А.К.

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

Движение проводящей морской среды в волне цунами в геомагнитном поле приводит к появлению электрического тока и, соответственно, к геомагнитным возмущениям. Электромагнитные поля, сопровождающие волну цунами, регистрируются как на поверхности, так и на океанском дне. Вертикальное смещение поверхности морской среды в волне цунами приводит к генерации акустико-гравитационной волны (АГВ) в атмосфере и ее распространению в ионосферу. Следовательно, волна цунами генерирует возмущение геомагнитного поля, которое формируется не только электрическим током в морской среде, но и током в ионосфере. Электрический ток в ионосфере возникает в результате ее движения в АГВ в геомагнитном поле. В работе рассмотрен механизм генерации возмущения геомагнитного поля, сопровождающего распространение волны цунами. Источником возмущения являются электрические токи в морской среде и в ионосфере.

Несмотря на то, что проводимость ионосферы значительно меньше проводимости морской среды, величина тока в ней может превышать величину тока в морской среде. Амплитуда электрического тока как в морской среде, так и в ионосфере пропорциональна произведению проводимости и скорости движения каждой из этих сред. Так как проводимость морской среды на три-четыре порядка превышает проводимость ионосферы, а скорость движения проводящей ионосферы на три-четыре порядка превышает скорость движения морской среды в волне цунами, то величина плотности тока в ионосфере может быть сравнима или больше величины плотности тока в морской среде. Это обусловлено экспоненциальным ростом скорости газа в АГВ в процессе ее распространения вверх.

Получено пространственное распределение геомагнитных возмущений, генерируемых электрическими токами, протекающими в морской среде и в ионосфере, с учетом их взаимной индукции. Наличие электрического тока в ионосфере значительно меняет характеристики возмущения геомагнитного поля, генерируемого волной цунами. С ростом горизонтального масштаба волны цунами и глубины морской среды ток в ионосфере, генерируемый АГВ, может увеличить амплитуду наблюдаемого на земле возмущения в несколько раз.

Оценки показывают, что для параметров дневной ионосферы амплитуда геомагнитных возмущений, связанных с волной цунами, может достигать значений (1 – 10) нТл. В ночных условиях интегральная проводимость ионосферной плазмы уменьшается на порядок, что приводит к существенному уменьшению влияния ионосферных токов. В модели электрический ток в ионосфере, генерируемый АГВ, замыкается на сопряженную ионосферу с помощью продольных токов, что приводит к возбуждению поперечных компонентов магнитного и электрического полей на высотах верхней ионосферы и магнитосферы. Амплитуда магнитного и электрического полей, а также продольного тока в ионосфере могут достигать значений порядка 10 нТл, 10 мВ/м, и 10^{-8} А/м², соответственно. Это позволяет сделать вывод о возможности мониторинга волны цунами космическими методами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01201356396, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-05-00962.

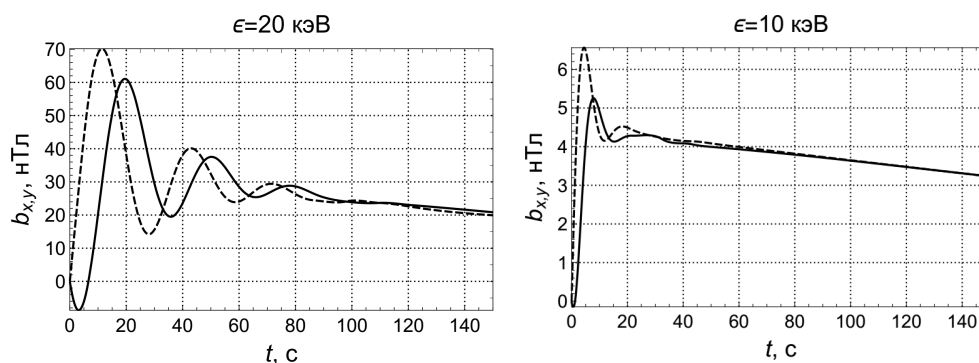
ГЕНЕРАЦИЯ КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Яценко А.К., Сорокин В.М.

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

Один из механизмов генерации геомагнитных пульсаций связан с локальным изменением ионосферной проводимости в присутствии внешнего электрического поля. Такой механизм обсуждался в работе [1] применительно к проблемам генерации пульсаций, а также искусственных колебаний геомагнитной силовой линии. В этих работах рассматривались процессы с характерными периодами $\gg 10$ с. Для таких периодов можно пренебречь полем магнитозвуковой волны по сравнению с полем направляемой волны. С уменьшением периода роль магнитозвуковой волны в формировании геомагнитных пульсаций возрастает.

В результате излучения магнитозвуковой волны при крупномасштабном в горизонтальном направлении возмущении проводимости нижней области ионосферы, вызванным ионизирующим излучением солнечной вспышки, в присутствии внешнего электрического поля возможна генерация колебаний геомагнитного поля в диапазоне периодов единицы-десятки секунд [2]. В зависимости от соотношения между величинами возмущений интегральных проводимостей Холла и Педерсена ионосферы может наблюдаться осциллирующий и аperiодический режимы этих колебаний. Амплитуда колебаний может достигать значений $\sim 10^2$ нТл. На графике ниже сплошной линией и пунктиром отображены временные зависимости рассчитанных компонент магнитного возмущения вдоль и поперек геомагнитного меридиана, для широты 45° и значений энергии кванта ионизирующего излучения 20 и 10 кэВ.



В работе проведен расчет электрического поля, наведенного в земле теллурического тока и выделившегося количества тепла, сопровождающего поглощение в ионосфере излучения солнечной вспышки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00962.

1. Ляцкий В.Б., Мальцев Ю.П. Магнитосферно-ионосферное взаимодействие. М.: Наука, 1983.
2. Сорокин В.М., Яценко А.К. // Геомагнетизм и аэрономия 1990. Т. 30. № 3. С. 425.

РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ ДЛИННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ИСКРЫ

**Сысоев В.С.¹, Кузнецов Ю.А.¹, Наумова М.Ю.¹, Орлов А.И.¹, Сухаревский Д.И.¹,
Лепехин Н.М.¹, Швец Н.Н.¹, Макальский Л.М.², Кухно А.В.², Гушин М.Е.³,
Богатов Н.А.³, Мареев Е.А.³**

¹ РФЯЦ ВНИИТФ ВНИЦ 900, Истра, Россия, v.s.sysoev@vniitf.ru

² НИУ МЭИ (ТУ), Москва, Россия

³ ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Электрическую искру в длинном воздушном промежутке можно считать физической моделью молниевых разрядов. В своем развитии искра имеет стадии, характерные для развития молнии в начальной фазе (лидерной в промежутке грозовое облако - земля, лидерной при достижении его стримерной зоны заземленного объекта, стадии обратного удара). Естественно, что в длинной искре возникают радиоизлучения, характерные для молнии. Источником радиоизлучения длинной искры (аналогично молниевому разряду) при этом являются стримеры (стримерная зона) и лидерный канал и канал искрового разряда в фазе развития обратного удара.

При эксперименте по моделированию молниевых разрядов искровым, все описанные фазы длинной искры должны быть достаточно четко выражены, то есть параметры длинной искры должны соответствовать определенным критериям. Прежде всего, это достаточная длина воздушного промежутка и определенная форма напряжения, подаваемого на него от импульсного высоковольтного источника.

В работах [1] было экспериментально исследовано радиоизлучение от стримерных разрядов в мегагерцовом и гигагерцовом диапазонах. В работе [2] эта задача исследована теоретически. Излучение от молниевых разрядов рассмотрено в [3].

В настоящей работе представлены некоторые результаты по экспериментальному изучению радиоизлучения длинной электрической искры. Эксперименты проводились на Комплексном Высоковольтном Стенде ВНИИ Технической Физики отделение ВНИЦ в г.Истра (<http://vniitf.ru/article/vnits>) на генераторе Маркса с амплитудой напряжения до 6 МВ (длина промежутка 5÷7 м, форма подаваемого импульса напряжения обеспечивала наличие в искре фаз развития разряда, указанных выше.) и на физической модели грозовой ячейки (потенциал заряженного облака до 1,5 МВ и длина искрового разряда до 2 м). Исследовалось радиоизлучение длинной искры в различных фазах ее развития.

Применение специальных измерительных радиотехнических приборов с высоким временным разрешением позволяло измерять характеристики радиоизлучения искрового разряда (в мегагерцовом и гигагерцовом диапазоне) синхронно с записями электрических и оптических характеристик искрового разряда. Результаты могут быть полезны при решении задач обеспечения надежной радиосвязи (в том числе и в гигагерцовом диапазоне) в условиях электромагнитных помех при высокой электрической активности атмосферы (гроза).

Работа выполнена в рамках гранта Российского Научного Фонда № 19-19-00501.

1. Сысоев В.С., Кузнецов Ю.А., и др. // XIII Межд. конф. «Забабахинские научные чтения», 20÷24 марта 2019г., Снежинск, Челябинская обл, Россия. <http://vniitf.ru/data/images/zst/2019/presents/sec-3/3-28ru-d.pdf>
2. Feng Shi, Ningyu Liu, Joseph R.Dwyer, Kevin M.A.Ihaddadene. VHF and UHF Electromagnetic Radiation Produced by Streamers in Lightning. Doi:10.1029/2018GL080309
3. Петров Н.И., Сисакян И.Н.. Излучение молниевых разрядов. //Компьютерная оптика. 1993, с.65÷76. <https://cyberleninka.ru/article/n/izluchenie-molnievogo-razryada/viewer>

ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ГАЗОПЫЛЕВЫМИ ОБЛАКАМИ ТВЕРДОТОПЛИВНЫХ РАКЕТ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ

Николайшвили С.Ш.¹, Платов Ю.В.²

¹ИПГ Росгидромета, Москва, Россия, ser58ge@mail.ru

²ИЗМИРАН, Москва, Россия

Оптические явления естественного происхождения в верхней атмосфере, доступные визуальным наблюдениям, относительно немногочисленны. Это полярные сияния, метеорные следы, серебристые облака, а также явления, связанные с электрическими разрядами в ионосфере. Но с развитием ракетно-космической техники в верхних слоях атмосферы стали наблюдаться оптические явления, сопровождающие запуски ракет, которые не имеют природных аналогов, и, вероятно, поэтому воспринимаются очевидцами как нечто аномальное.

Рассматриваются эволюция и свечение крупномасштабных (радиусом более 1000 км) газопылевых облаков, образующихся в верхней атмосфере Земли в результате выброса в окружающее пространство продуктов сгорания и ракетного топлива при разделении ступеней твердотопливных ракет. В качестве основных механизмов свечения рассматриваются рассеяние солнечного излучения на дисперсных частицах продуктов сгорания и ракетного топлива, а также резонансная флуоресценция монооксида алюминия.

Представлено сравнение расчетов свечения при различных распределениях вещества внутри облака с фотометрическими разрезами изображений наблюдавшихся газопылевых облаков.

Полученные данные позволяют оценить дисперсный состав облака и динамические параметры его развития.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ЧАСТОТАХ НИЖЕ 800 ГЦ. CASE STUDY ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА «ОБСТАНОВКА (1 ЭТАП)».

**В.А.Грушин¹, С.И.Климов¹, В.Е.Корепанов², Ш.Салаи³, В.А.Пилипенко¹, В.И.Захаров⁴,
И.Э.Белова¹, Д.И.Новиков¹.**

1- ИКИ РАН, Москва, 2-Львовский филиал ИКИ академии наук Украины, 3-Вигнеровский научный центр Венгерской академии наук, 4-Физический факультет МГУ.

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

Эксперимент «Обстановка (1 этап)»[1,2] проводился на Российском сегменте МКС в период с 23 апреля 2013 г. по 9 мая 2015 г. В ходе эксперимента были получены, в частности, данные о вариациях параметров магнитного поля, тока плазмы и электрического поля на расстоянии 1.7 м от поверхности станции. В настоящей работе исследуется влияние на измеренные параметры географических и погодных факторов в сравнении с геомагнитными и солнечными. Построены карты максимальных значений вариаций за период в несколько месяцев. В географических координатах прослеживается связь этих карт с контурами континентов. По построенным гистограммам можно судить о зависимости результатов измерений от освещённости подстилающей поверхности и от освещённости станции. Специальный интерес представляет изучение статистик по «следающим» пространственно-временным интервалам, характеризующим такие крупномасштабные погодные явления, как тропические циклоны. Полученные результаты позволяют подтвердить сделанные ранее выводы[3,4] о том, что измерения на борту МКС чувствительны к масштабным геофизическим явлениям, также как измерения, выполненные на специализированных спутниках электромагнитного мониторинга[5,6].

Работа выполнена при частичной поддержке гранта 18-05-00108 РФФИ.

1. Klimov S., Grushin V., Novikov D., et al. Monitoring of Space Weather Electromagnetic Parameters in the Ionosphere. Project's: "Chibis-M", "Obstanovka (1 stage)", "Vernov". ISSN 2367-7570 Workshop "Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere" Book of Proceedings Eighth Workshop, Sunny Beach, Bulgaria, May 30 - June 3, 2016, p. 74-81. <http://ws-sozopol.stil.bas.bg/2016Sunny/Proceedings2016.pdf>.

2. В.А. Грушин, С.И. Климов, Д.И. Новиков, В.Е. Корепанов, И.Э. Белова, Ш. Салаи, К. Балайти, Я. Надь. Пространственно-временной анализ аномалий ионосферных электромагнитных полей, измеренных аппаратурой эксперимента «ОБСТАНОВКА (1 ЭТАП)» на борту российского сегмента МКС. Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 16–20 февраля 2015г., ИКИ РАН Сборник тезисов.

3. В.А.Грушин, С.И.Климов, Б.Киров, В.Е.Корепанов, Ш.Салаи, П.Сегеди, И.Э.Белова, Л.Д.Белякова, Т.В. Гречко, О.В.Лапшинова, Д.И.Новиков. Совместный анализ плазменных и электромагнитных данных международного эксперимента «Обстановка (1 этап)» на борту РС МКС. Тринадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 12-16 февраля 2018г., ИКИ РАН Сборник тезисов.

4. С.И.Климов, В.А.Грушин, и др. Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперименте «Обстановка (1 этап)» на Российском сегменте МКС. Научно-методические аспекты эксперимента (статья принята в журнал *Космическая техника и технологии*).

5. V.I.Zakharov, V.A.Pilipenko, V.A.Grushin. Using SWARM satellite mission to study the effects of large tropical cyclones on the ionosphere. The fourth COSPAR symposium "Small satellites for sustainable science and development", 4-8 november 2019.

6. В.И.Захаров, В.А.Пилипенко, В.А.Грушин, А.Ф.Хамидуллин. Влияние тайфуна Vongfong 2014 на ионосферу и геомагнитное поле по данным спутников SWARM: 1. Волновые возмущения ионосферной плазмы. Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 2.

ОЦЕНКА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА В МЕТРОВОМ И ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН

Филиппов М.Ю., Тютин И.В.

АО РТИ, г. Москва, Россия, mm.grif@gmail.com

Для прикладных задач в качестве альтернативного источника данных об интегральной солнечной активности предлагается использовать данные мощности радиоизлучения Солнца, полученные в частотном диапазоне радиолокационных станций, в частности, метровом и дециметровом. В докладе описывается метод расчета индекса F10,7 на основе весового усреднения среднесуточных величин мощности радиоизлучения за несколько суток. Представлены результаты сравнения временных рядов индекса F10,7, полученных указанным методом, с наблюдениями на частоте 2800 МГц [1].

1. <http://www.wdcb.ru/stp/data/solar.act/flux10.7/daily/>

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ШИРОТ ПРИ РАЗЛИЧНОМ СОСТОЯНИИ ИОНОСФЕРЫ НА ЧАСТОТАХ СИСТЕМЫ РАДИОНАВИГАЦИИ РСДН-20 (АЛЬФА).

Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В.

ПГИ, г. Анапты, Россия, akhmetov@pgia.ru

К сверхдлинным волнам относят электромагнитные волны очень низкой частоты (ОНЧ) с частотами 3-30 кГц. Данный диапазон в основном используется для передачи сигналов радионавигации. Определяющие влияние на распространение радиоволн ОНЧ диапазона оказывают вариации электронной концентрации и высота отражающего слоя. Наличие реакции на изменения электронной концентрации в D слое ионосферы и регулярно действующие источники радиосигнала предоставляют возможность проведения геофизических исследований ионосферы методом измерения характеристик принимаемых радиосигналов. Метод численного эксперимента позволяет получить эталонные характеристики радиосигналов в различных, полностью контролируемых, геофизических условиях, что имеет большое значение для дальнейшей интерпретации данных.

В докладе авторами представлены результаты серии численных экспериментов по прохождению электромагнитных сигналов в волноводе Земля – Ионосфера при различных геофизических условиях. Профили ионосферных параметров, используемые для моделирования, получены на основе данных радара некогерентного рассеивания EISCAT, двух экспоненциальной модели ионосферы Уайта [1] и методов интерполяции. Численная схема, используемая для моделирования распространения электромагнитных волн разработана авторами, и является явной, консервативной, монотонной, имеет 2-й порядок точности по времени и 3-й по пространственным переменным [2]. Используемая схема интегрирования уравнений Максвелла позволяет моделировать распространение широкополосных сигналов в замагниченной ионосферной плазме. В качестве источника использовался плоский массив электрических диполей высотой 60 км и шириной 100 км. Сигнал источника представлял собой сумму гармонических колебаний на частотах радиотехнической системы дальней навигации (РСДН-20), а именно 11905, 12679, 14881 Гц [3].

Во условиях магнитной суббури 11.12.2015 г. по полученным данным численных экспериментов, наблюдаются значительные, более десятков процентов отклонения амплитуд сигналов на уровне поверхности Земли. В то же время фазовые характеристики оказались гораздо более стабильными, их изменения для разных профилей ионосферных параметров не превысили 10%. В исследованных ионосферных условиях наблюдалась значительная частотная зависимость. С ростом частоты растет и относительное изменение характеристик электромагнитных сигналов в случае возмущенной ионосферы.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности использования сигналов РСДН-20 на частоте 14881 Гц для геофизических исследований ионосферы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018).

1. Wait, J. R., Spies K. P. // Technical Note 300, National Bureau of Standards, Boulder, Colorado. 1964. P. 96.

2. Мингалев И.В., Мингалев О.В., Ахметов О.И., Суворова З.В. // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 12. С. 17.

3. Радионавигационные системы дальней навигации (РСДН): учебно-методическое пособие / сост. А.В. Хафизов. Кировоград: Изд-во ГЛАУ, 2010. 30 с.

SUBAURORAL ION OUTFLOW WITHIN POLARISATION JET

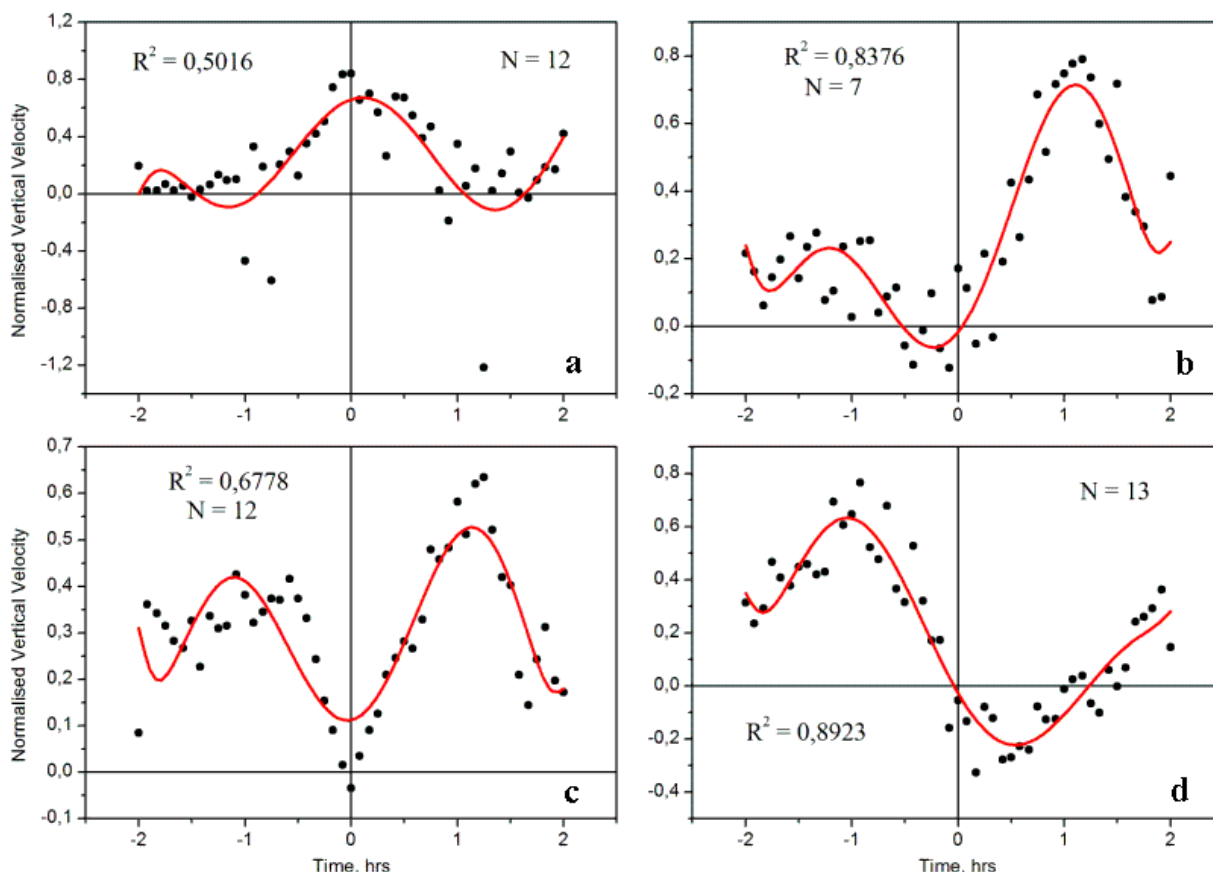
Stepanov A.E.², Khalipov V.L.¹, Gololobov A.Yu.³, Golikov I.A.², Kotova G.A.¹, Bondar E.D.²

¹Space Research Institute, Moscow, Russia, khalipov@iki.rssi.ru

²Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Yakutsk, Russia

³North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

Polarisation Jet, or SAID, is a narrow band of fast westward convection which can appear during magnetic storms in the subauroral zone approximately along the nightside plasmapause. It causes strong heating of subauroral plasma due to collisions, fast plasma outflows, and ion conic formation. It results at F-region altitudes in upward or downward plasma motions, a narrow drop in density, or "trough in the trough", changes in ion composition, an electron temperature peak, weak SAR-arc, density inhomogenieties and other effects. Data on ion drifts and field-aligned ion outflows from Kosmos-184 and DE-2 satellites at ionospheric altitudes are analysed. Model calculation have shown that bi-Maxwellian ion distributions resulting from perpendicular ion heating in regions where the magnetic field is inclined to the satellite velocity vector, can produce vertically asymmetric fluxes in a driftmeters frame which mimic fast field-aligned ion flows. It is shown that in many cases the data within the Polarisation Jet are consistent with the contribution of the perpendicular ion heating as an additional cause of the observed fast convection.



The vertical component of the plasma drift velocity as a function of the horizontal drift velocity measured by the American ionosonde DPS-4. The zero mark corresponds to the maximum value of the horizontal component. The increase in the vertical velocity with a decrease in the horizontal velocity is due to the fact that the neutral spark, now entrained in motion, generates heating due to the increased velocity difference between ions and neutrals. The maximum vertical velocity is reached before the maximum horizontal velocity because the neutrals acquire velocity in the direction of the ion drift and the velocity difference decreases.

КИНЕТИКА СИНГЛЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ ВЫСЫПАНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

Кириллов А.С., Белаховский В.Б.

ПГИ, г. Апатиты, Мурманская область, Россия, kirillov@pgia.ru

Радиационные пояса Земли представляют с собой области, в которых заряженные частицы (протоны, электроны) захвачены геомагнитным полем. Электроны внешнего радиационного пояса могут ускоряться до релятивистских энергий (несколько МэВ) во время геомагнитных возмущений. Высыпания в атмосферу являются одним из основных механизмов потерь заряженных частиц внешнего радиационного пояса. В последние годы появилась серия работ [1-3], связанных с расчетами скоростей ионообразования в атмосфере Земли, вызванного вторжением релятивистских электронов в верхнюю и среднюю атмосферу.

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 [4,5] были проведены расчеты профилей скоростей свечения полос первой положительной (1PG) и второй положительной (2PG) систем молекулярного азота, обусловленных спонтанными излучательными переходами между триплетными состояниями $N_2(B^3\Pi_g, v) \rightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+, v') + h\nu_{1PG}$ и $N_2(C^3\Pi_u, v) \rightarrow N_2(B^3\Pi_g, v') + h\nu_{2PG}$, на разных высотах верхней и средней атмосферы во время вторжения в атмосферу релятивистских электронов (от 100 кэВ до 10 МэВ).

В настоящей работе рассмотрена кинетика синглетных состояний $a^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$ молекулярного азота на высотах средней атмосферы во время вторжения релятивистских электронов. При этом были учтены процессы электронного возбуждения $e + N_2(X^1\Sigma_g^+, v=0) \rightarrow e + N_2(a^1\Sigma_u^-, a^1\Pi_g, w^1\Delta_u, v)$, вторгающимися в атмосферу релятивистскими частицами и вторичными электронами, процессы спонтанного излучения, а также перенос энергии возбуждения молекул между синглетными состояниями при молекулярных столкновениях. Константы скоростей переноса энергии возбуждения между указанными синглетными состояниями при столкновениях с молекулами N_2 и O_2 были теоретически рассчитаны согласно квантово-химическим приближениям [6,7]. Впервые показано, что кинетика рассмотренных синглетных состояний N_2 на высотах средней атмосферы во многом обусловлена процессами гашения при неупругих молекулярных столкновениях. Рост концентраций основных молекулярных составляющих (главным образом молекулярного кислорода) приводит к значительному понижению колебательных населенностей синглетных состояний по сравнению с населенностями состояния $C^3\Pi_u$ (ответственного за свечение полос 2PG системы) и скоростями ионообразования, что связано со значительным ростом скоростей гашения при молекулярных столкновениях по сравнению с вероятностями излучательных переходов на нижних высотах.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект 18-77-10018).

1. Artamonov A.A. et al., 2016, J. Geophys. Res., v.121, p.1736-1743.
2. Artamonov A.A. et al., 2016, J. Atmos. Solar-Terr. Phys., v.149, p.161-166.
3. Artamonov A.A. et al., 2017, Adv. Space Res., v.59, p.2295-2300.
4. Kirillov A.S., Belakhovsky V.B. 2019, Geophys. Res. Lett., v.46, p.7734-7743.
5. Кириллов А.С., Белаховский В.Б., 2020, Геомаг. Аэрон., т.60, №1.
6. Kirillov A.S., 2011, J. Quant. Spec. Rad. Trans., v.112, p.2164-2174.
7. Кириллов А.С., 2011, ЖТФ, т.81, №12, с.34-38.

АВРОРАЛЬНАЯ СУББУРЯ 23.12.2014: СИНХРОННЫЕ GPS, ГЕОМАГНИТНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Захаров В.И.¹, Чернышов А.А.^{2,3}, Милош В.⁴, Джин Я.⁴,

¹МГУ им. Ломоносова, г. Москва, Россия, zvi_555@list.ru

²ИКИ РАН, г. Москва, Россия

³Западное Отделение (филиал) ИЗМИРАН; г. Калининград, Россия

⁴Университет Осло, Физический факультет, г. Осло, Норвегия

Исследования, проведенные в данной работе, включают в себя анализ влияния авроральной суббури, произошедшей вечером 23.12.2014 года, на сбои навигационных параметров в высокоширотном регионе и совместные исследования оптических данных камеры полного неба, а также данных магнитометров и межпланетного магнитного поля. Такой подход позволяет провести более полный анализа ионосферных условий и динамики их изменений во время геомагнитной активности. В работе использованы данные станций IGS скандинавского сектора.

Подробно изучены взаимосвязи между сбоями в основных параметрах навигационных сигналов и оптическими авроральными эмиссиями, обусловленными высыпанием заряженных частиц из магнитосферы в ионосферу. Так, можно утверждать, что в рассмотренном нами событии сбой в навигационных сигналах GPS связаны с высыпанием авроральных частиц в высокоширотной ионосфере. Количество сбоев на рабочей частоте L2 имеет ожидаемо большее количество сбоев, чем для L1 во время геомагнитной активности в полярных областях, что совпадает с результатами других работ. Изучение динамики исследуемых процессов показало, что авроральная суббуря приводит к увеличению сбоев на частоте L2 на станциях Сонданкюля и Скиботн с задержкой в несколько часов, что, вероятно, связано с особенностями развитием плазменной турбулентности, возникающей из-за магнитных возмущений. Установлено, что максимум возникновения сбоев приходится на фазу восстановления геомагнитной суббури. Этот факт отражает динамику влияния суббури на ионосферу и, по всей вероятности, связан с динамикой неоднородностей и неустойчивостей плазмы в высокоширотной ионосфере во время геомагнитной активности. Впервые совместно проанализированы сбои в параметрах GPS и оптические эмиссии во время геомагнитной суббури и получена их взаимосвязь.

Высыпание высокоэнергичных частиц в авроральном овале играет важнейшую роль в структурировании высокоширотной ионосферы и влияет на распространение трансionoсферных радиоволн. Поэтому мониторинг геофизических условий имеет большое значение для распространения волн и производительности систем ГНСС. Таким образом, важно консолидировать усилия по улучшению средств и подсистем для контроля целостности сигналов ГНСС, а также дифференциальной коррекции для быстрого обнаружения и эффективной компенсации сбоев и кратковременного ухудшения сигналов ГНСС в неблагоприятных геофизических условиях.

Работа выполнена в рамках Государственного задания МГУ и ИКИ РАН, при частичной поддержке РНФ 17-77-20009 (ААЧ) и РФФИ 19-05-00941 (ЗВИ).

О ВЛИЯНИИ ГЕО- ГЕЛИОФИЗИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА СЦИНТИЛЛЯЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ МИССИИ SWARM В 2014г.

Захаров В.И. , Волобоев Л.А.,

*МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия, zvi_555@list.ru,
l.voloboev@mail.ru*

В данной работе рассматриваются вопросы выделения и исследований статистики флуктуаций электронной концентрации в ионосфере Земли в различных гео-гелиофизических условиях по данным спутниковых измерений.

В качестве источника экспериментальных данных взят массив высокочастотных наблюдений с ИСЗ Swarm, спутниковой миссии ESA, предназначенной для изучения магнитного поля Земли. Миссия стартовала в 2013г. и состоит из трёх спутников на различных полярных орбитах. Два спутника, находятся на нижней орбите высотой 460 км и их движение синхронизовано с поддерживаемым расхождением по долготе в 1.4 градуса и по времени от 4 до 10 секунд. Третий спутник расположен на более высокой орбите – 530 км. На каждом летательном аппарате, помимо основного магнитометрического оборудования, в передней части космического аппарата установлены зонды Ленгмюра, ведущие измерения электронной концентрации с высокой частотой опроса. В настоящей работе использованы данные об электронной концентрации, полученные с частотой 2 Гц.

Полученные экспериментальные данные усредняются методом скользящего среднего (окно усреднения 120 отсчетов соответствует 1 минуте), выделяется высокочастотная составляющая – сцинтилляции электронной концентрации. Вычисляется средняя мощность шумов флуктуаций – индекс аналогичный индексу сцинтилляций S4, подбираются окна фильтрации, соответствующие требуемому пространственному разрешению (так окно размером 30 отсчетов соответствует 15с или 1 градусу широты), проводится статистический анализ выделенных флуктуаций электронной концентрации.

Также на основе базы данных индексов Kp и AE магнитного поля рассматривается влияние солнечной активности на флуктуации электронной концентрации в ионосфере Земли в 2014г. Так проведено сравнение сцинтилляций в условиях с возмущенной геомагнитной обстановкой (12 сентября 2014, Kp 3-6) и с умеренной (1 января 2014, Kp 1-3).

Получены и исследованы зависимости флуктуаций электронной концентрации и их средней мощности шумов от магнитной широты. Величины фильтров обеспечивают необходимое пространственное разрешение для исследования флуктуаций в различных широтах.

В ходе исследований проводится также проверка соответствия наблюдений электронной концентрации и температуры в различных условиях данным одной из наиболее часто используемых моделей ионосферы – International Reference Ionosphere (IRI), версии 2016г.

Также был введен новый индекс dS₄, описывающий скорость изменения индекса сцинтилляций S₄, проведенный через процедуру скользящего среднеквадратичного отклонения (с окном 10 секунд) для дальнейшего сравнения с индексом RODI 10s. Предварительные исследования показали, что индекс dS₄ чувствителен к глобальным вариациям индекса AE и не менее, чем индекс RODI чувствителен к высокоширотным вариациям электронной плотности.

ВЫЯВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ И МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИХ ОТКЛИКОВ ОРГАНИЗМОВ НА ВОЗДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ДРУГИХ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ АГЕНТОВ В УСЛОВИЯХ АРХИПЕЛАГА ШПИЦБЕРГЕН

Tsetlin V.V., Белишева Т.К., Степанова Г.П., Халипов В.Л.

ФГБУН ГНЦ РФ –ИМБП РАН, г. Москва, Россия, v_tsetlin@mail.ru

Работа посвящена выявлению свойств воды как детектора воздействия космофизических агентов на организм человека в условиях архипелага Шпицберген. Цель исследования состояла в оценке степени сопряженности между изменениями окислительно-восстановительных свойств воды (вне организма), вариациями различных космофизических факторов и динамикой психофизиологических показателей состояния организма человека, а также для выявления физических и медико-биологических откликов воды как детектора или сенсора воздействия внешней среды на организм человека. Психофизиологическая оценка функционального состояния организма человека проводилась на группе добровольцев (43 человека), в п. Баренцбург арх. Шпицберген, в период с 30 июля по 18 августа 2018 г. на основе ежесуточной регистрации интегральных показателей состояния организма с применением метода ГРВ, оценки состояния сердечно-сосудистой системы (ССС), свертываемости крови, психоэмоционального состояния. Свойства воды как детектора интегрального воздействия физико-химических процессов в окружающей среде, оценивали на основе окислительно-восстановительного потенциала (ОВП, мВ) с применением иономера типа И-160МИ. Показано, что флуктуации ОВП воды в условиях арх. Шпицберген ассоциированы с вариациями характеристик солнечного ветра и потоков солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см, также с психофизиологическими показателями состояния организма. На основании показателей ОВП воды вне организма выявлена возможность прогнозирования состояния организма. Исследования показали, что вода представляет собой своеобразный сенсор, чувствительный к воздействию электромагнитного излучения (ЭМИ), которое генерирует ионосферная плазма в ВЧ диапазоне от 100 кГц до 30 МГц. Вариации излучения ионосферы, как известно, определяются электронной плотностью плазмы, зависящей от текущего годового и сезонного уровней солнечной активности, возмущенности геомагнитного поля, эффектов магнитосферных высыпаний частиц и других факторов.[1]. Активация воды организмов зависит от энергетических и частотных свойств ЭМИ, достигающего земной поверхности и поглощающегося в живых системах. При прогнозировании биотропных воздействий ЭМИ необходимо учитывать плотность и состав земной атмосферы, влияющих на поглощение излучения. Колебания значений ОВП отражаются в синхронных колебаниях функционального состояния биологических систем, что позволяет считать такой детектор моделью, имитирующей состояние водной среды в организме. Предлагается использовать детекторные свойства воды для изучения интегрального воздействия среды на организм человека в обитаемых космических аппаратах.

1. Будько Н., Зайцев А., Карпачев А. и др. Космическая среда вокруг нас. /А.Н.Зайцев, ред., Троицк, 2006.

ВЫСЫПАНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ МОДИФИКАЦИИ ИОНОСФЕРЫ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ СТЕНДА СУРА НАД ВОЗМУЩЕННОЙ СТЕНДОМ ОБЛАСТЬЮ

Рябов А.О., Фролов В.Л.

НИРФИ ННГУ, Нижний Новгород, Россия

В рамках экспериментов по стимуляции верхней области ионосферы Земли были зарегистрированы случаи эффективного возбуждения искусственных высыпаний энергичных электронов в ионосферу, которые появляются через 5 – 10 мин после включения ВН и исчезают через 5 – 15 мин после её выключения, где большие времена отвечают условию «холодного старта» начала нагрева плазмы после длительной паузы её излучения. Величина потоков энергичных электронов с $E \approx 100$ кэВ в среднем составляет $F \approx 10 - 100$ эл/(см²·с·стер·кэВ). Область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 1200 км с юга на север; размер области высыпаний в ортогональном к меридиану направлении может составлять до 300 км. Полученные экспериментальные данные позволяют оценить полную мощность, вносимую высыпающимися электронами в ионосферу как (60 – 600) кВт, что сравнимо или даже несколько больше мощности, генерируемой передатчиками нагревного стенда.

Похожие результаты зафиксированы и в экспериментах, связанных с магнитосопряженной областью (МСО). Искусственные высыпания энергичных электронов в ионосферу в магнито-сопряженной области появлялись через 25 – 30 мин после включения ВН. Величина потоков энергичных электронов с $E \geq 100$ кэВ в среднем составляет $F \approx 20-100$ эл/(см²·с·стер·кэВ), что в несколько раз превосходит значения этих величин в естественных условиях. Область высыпаний вдоль геомагнитного меридиана имеет размеры до 2200 км с юга на север; размер области высыпаний в ортогональном к меридиану направлении может составлять до 500 км. В сравнении с высыпаниями в возмущенной области в случаях высыпаний в МСО значения энергии и потоков имеют больший разброс, что объясняется непредсказуемостью стимуляции высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли в МСО. Интересным представляется, что значения энергии и потоков в наиболее результативные сеансы превосходят случаи высыпаний над стендом.

Механизмом стимулирования высыпаний энергичных электронов из радиационного пояса Земли предполагается их взаимодействие с ОНЧ радиоволнами (вистлерами). В случае излучения ВН в режиме «несущая», как в нашем случае, механизм генерации ОНЧ волн может быть следующим. Согласно [1], в области взаимодействия ВН с плазмой генерируются нижнегибридные волны. Рассеиваясь на мелкомасштабных неоднородностях, они могут трансформироваться в ОНЧ волны, занимающих диапазон частот от нескольких килогерц до 15 – 20 кГц, которые покидают область резонансного взаимодействия ВН с плазмой и вдоль силовых линий геомагнитного поля уходят в магнитосферу.

Исследования выполнялись при поддержке РФФИ (гранты № 20-05-00166 А и № 19-52-15007 НЦНИ_a).

1. Vartanyan, A., G. M. Milikh, B. Eliasson, et al. Generation of whistler waves by continuous HF heating of the upper ionosphere. // Radio Sci., 2016. Vol. 51, pp. 1188–1198, doi:10.1002/2015RS005892.

СТОЯЧАЯ УДАРНАЯ ВОЛНА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ

Высикайло Ф.И., Некрасов Г.Ю., Пронин Н.А.

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

Установлены и верифицированы основные причины возникновения плазменных слоев объемного заряда (стоящих ударных волн электрического поля) на расстояниях ~ 50 км от поверхности Земли. (Ударная волна электрического поля – аналог эффекта Гана в полупроводниках). Исследованы аналитически: 1) глобальная электрическая цепь гелиосферы (ГЭЦГ); 2) структуры стоячих ударных волн электрического поля в геосфере отрицательно заряженной Земли в зависимости от ее заряда; 3) неоднородная плазма геосферы: мезосферы и нижней ионосферы отрицательно заряженной Земли и 4) бесконтактный нагрев электронов в электрическом поле заряженных астрофизических объектов таких как звезды и планеты. Доказывается, что основная причина этих явлений, – ничтожный положительный заряд Солнца (звезд, порядка 1000 Кл) и отрицательный заряд Земли (планет, порядка 500 000 Кл) [1]. Во многом это явление аналогично явлениям формирования потока ионов в области анодного падения потенциала в обычных газовых разрядах. При этом глобальный ток обусловлен процессами максвеллизации в плазменных структурах и уходом высокоэнергетичных электронов из звезд. Этот парадокс аналогичен парадоксу Штарка. В 1903 г. он экспериментально установил обратное движение катодного пятна в поперечном (току) магнитном поле. Впервые исследуется синергетика (со-организация, совместное действие) конвективных дуальных (кумулятивных и диссипативных) потоков в области заряженных структуру Космоса: звезд и планет, в частности исследуются общие причины возникновения солнечного ветра и ионосферы отрицательно заряженной Земли. По известному заряду Земли построены профили температуры электронов в нижней ионосфере Земли. Доказано, что в нижней ионосфере идут процессы ионизации в поле отрицательно заряженной Земли и на высотах 50 км формируется ударная волна электрического поля, обуславливающая спрайты на этих высотах. Показано, что слой положительного заряда, компенсирующий отрицательный заряд Земли (компенсационный слой [2]) в рамках дрейфовой гидродинамической модели существовать не может из-за противоположного сноса отрицательных и положительных зарядов в поле отрицательно заряженной Земли.

1. Высикайло Ф.И. Архитектура кумуляции в диссипативных структурах. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing. 2013, - 352 с.
2. Смирнов Б.М. Электрический цикл в земной атмосфере. УФН. 2014. Т. 184. № 11, 1153-1176.

Study of Arctic and Antarctic region ionosphere and their inter comparison during low solar activity year 2008

Arun Kumar Singh^{1, 2}

1. CSIR-National Physical Laboratory, Dr. K. S. Krishnan Marg, New Delhi-110012, India
2. Academy of Scientific and Innovative Research (AcSIR), CSIR-HRDC Campus, Postal Staff College Area, Sector 19, Kamla Nehru Nagar, Ghaziabad, Uttar Pradesh 201002

A. arsurya123@gmail.com

Abstract

In this paper, we investigated the symmetry and asymmetry of Total electron Content (TEC) values at northern and southern hemisphere region ionosphere and their dependence on interplanetary magnetic field (IMF). It also describes the TEC variation co-relation with the amplitude and phase scintillation on polar region. In view of this, the TEC data recorded with the help of Global Ionospheric Scintillation and TEC monitoring (GISTM) system installed at Indian permanent scientific base “Himadri station” [78°55’N 11°56’E] and “Maitri station” [70°46’00”S 11°43’56”E] has been utilized. The recorded %TEC variation is higher at Antarctic region (-40% to 60%) in comparison to Arctic region (-25% to 25%), it explained the role of sun with the photo ionization process. It is found that TEC variation is a function of magnetosphere–ionosphere coupling and it depends on IMF orientation and magnitude in X, Y, Z plane. It is illustrated that the TEC value at northern region shown an enhancement when $B_x < 0$, $B_y < -6\text{nT}$ or $B_y > 6\text{nT}$ and $B_z > 0$ and at southern region when $B_x > 0$, $-6\text{nT} < B_y < 6\text{nT}$ and $B_z < 0$. Result also shows that during disturbed day the intensity of phase scintillation is higher and it shows a good correlation with the temporal variation of TEC at both the stations and the phase scintillation is more pronounced than the amplitude scintillation. These variations are studied in terms of particle precipitation, auroral oval expansion, Joules heating phenomena, TEC variations and other ionospheric parameters.

АКТИВНЫЙ ИОНОСФЕРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ «NORTH STAR» КАК МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ СТРУКТУР, УСКОРЯЮЩИХ ИОНЫ ПОПЕРЕК ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ С ПОМОЩЬЮ VV-ELF ВОЛН.

Ковалева И.Х.

ИДГ РАН, г. Москва, Россия, ikhkov@idg.chph.ras.ru

Нагрев ионов в полярной средней ионосфере является важным фактором связи ионосфера-магнитосфера. В настоящее время многочисленными ракетными, спутниковыми и радарными средствами накоплен обширный экспериментальный материал по поперечному нагреву ионов, связанному с VV-ELF волновыми возмущениями в широком диапазоне высот от 350 км. до 2000 км. Выделены основные свойства среды – условия возникновения процесса ускорения ионов. Описаны пространственные и временные характеристики волновых возмущений, сопровождающих ускорение, их частотный диапазон. Зафиксировано, что, как правило, процесс нагрева затрагивает какой-то один из ионов плазменной смеси. Предложен целый ряд моделей, описывающих механизмы такого нагрева, и получены характерные времена, необходимые для нагрева ионов по этим механизмам. В активном ионосферном эксперименте «North star» [1,2] по инъекции плазменной струи в ионосферу поперек геомагнитного поля так же регистрировался поток сверхтепловых ионов. Причём, сверхтепловые ионы с энергиями в несколько сотен эВ регистрировались на стадии релаксации плазменного облака, когда поток быстрых ионов струи был уже за пределами измерительной аппаратуры. Поэтому был проведён реанализ экспериментальных данных данного активного эксперимента в предположении активации поперечного ускорения ионов по механизму аналогичному ускорению ионов в естественных условиях. Так же, как в естественных условиях, существовал поперечный градиент плотности плазмы, неравновесное состояние среды, поток мягких сверхтепловых электронов. На основе данных по потоку электронов был сделан вывод о наличии сильного DC поперечного электрического поля. Кроме этого регистрировались все те свойства волновых возмущений в VV-ELF диапазоне, которые были получены при регистрации поперечного ускорения ионов в естественных условиях.

Временные характеристики нагрева ионов не позволяют сопоставить механизм нагрева ионов с каким-то из ранее предложенных механизмов. Поэтому был предложен новый механизм ускорения ионов поперек геомагнитного поля. Он основан на гипотезе возникновения нелинейных градиентно-дрейфовых волновых возмущений ионно-циклотронного типа на ионах определённого вида [3,4], перемещающихся вдоль направления градиента и вдоль внешнего DC электрического поля. Так как движение нелинейной волновой структуры сопровождается смещением ионов вдоль электрического поля, это приводит к нагреву ионов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0146-2017-0013

1. Erlandson R. E., Meng C.I., Swaminathan P.K., et al.//Journal of Spacecraft and Rockets, 2004, V.41 (4), pp.483-489.

2. Gavrilov, B. G., I. M. Podgorny, D. B. Sobyannin, J. I. Zetzer, et.al.// J. Spacecraft Rockets, 2004. V.41 (4). pp. 490-495

3. I. Kh. Kovaleva Dissipative ion-cyclotron oscillitons in a form of solitons with chirp in Earth's low-altitude ionosphere. Phys. Plasmas 2012, 19, 102905 doi: 10.1063/1.4763561

4. Ковалева И.Х. Диссипативные ионно-циклотронные солитоны с чирпом в плазме нижней ионосферы Земли, содержащей несколько видов ионов. Физика плазмы 2013, Т.39, №3, с1-11

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАДИОВОЛН В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА ТРАССАХ СПУТНИК-СПУТНИК ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНОЙ БУРИ 22–23 ИЮНЯ 2015 ГОДА

Губенко В.Н., Андреев В.Е., Кириллович И.А., Губенко Т.В., Павельев А.А.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, vngubenko@gmail.com

В работе проанализированы результаты около 100 радиозатменных сеансов зондирования высокоширотной ($>65^\circ\text{N}$) атмосферы северного полушария Земли, которые были проведены 22–24 июня 2015 года на несущей GPS-частоте 1545,42 МГц (диапазон L1) в эксперименте FORMOSAT-3/COSMIC. Корональные выбросы плазмы, дошедшие до Земли в этот период, спровоцировали магнитную бурю класса G4 (сильный геомагнитный шторм, планетарный Кр-индекс равен 8), которая в свою очередь вызвала значительные ионосферные флуктуации радиоволн на трассах зондирования: навигационные (GPS) спутники – низкоорбитальные (FORMOSAT-3/COSMIC) спутники.

В результате обработки радиозатменных сеансов FORMOSAT-3/COSMIC были исследованы флуктуации эйконала (набега фазового пути) и интенсивности зарегистрированных радиосигналов, прошедших через нижнюю ионосферу Земли. Кросс-корреляционный анализ указанных флуктуаций показал, что коэффициент корреляции для сеансов просвечивания до начала бури составляет более 50%, а во время бури близок к нулю. Мощность флуктуаций эйконала и интенсивности радиозатменного сигнала зависит от геометрии эксперимента, координат зондируемого района (широты, долготы, высоты перигея луча) и локального времени сеанса просвечивания. Полученные результаты свидетельствуют об увеличении мощности мелкомасштабных флуктуаций эйконала и интенсивности радиоволн в анализируемых спектрах во время сильной геомагнитной бури.

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и Программой № 12 Президиума РАН.

ВКЛАД СУББУРЕВЫХ ВЫСЫПАНИЙ В ПОЛНОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ ИОНОСФЕРЫ

Белаховский В.Б.

Полярный геофизический институт, г. Апатиты

В работе произведена оценка вклада ионосферных слоев в изменение полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, определяемого по данным GPS приемников, во время суббуревых высыпаний заряженных частиц. Значения концентрации ионосферной плазмы, определяемой по данным радара некогерентного рассеяния UHF EISCAT в Тромсе, интегрировались по высоте (примерно от 100 до 500 км) и пересчитывались в единицы измерения ПЭС (TECU). Использованы GPS приемники на станциях TRO, SKI, KIR расположенные вблизи радара EISCAT. Для идентификации геомагнитных суббурь использованы данные магнитометров сети IMAGE, а также оптические наблюдения полярных сияний в эмиссиях 557.7, 630.0 нм на станции LOZ. Анализ показывает, что во время суббуревых высыпаний основной вклад в ПЭС (около 90%) обеспечивается концентрацией плазмы на высотах примерно 100-400 км. Поэтому вклад плазмосферы в ПЭС ионосферы достаточно мал во время суббуревых высыпаний в высоких широтах.

ДЕКАМЕТРОВАЯ РАДИОДИАГНОСТИКА КРУПНОМАСШТАБНОГО ОБЛАКА ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЫ С ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

Афанасьев Н.Т.¹, Трофимов Е.А.¹, Чудаев С. О.²

¹ИГУ, г. Иркутск, Россия, spacemaklay@gmail.com

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия.

Одной из важных задач радиофизического мониторинга ближнего космоса является диагностика тонкой турбулентной структуры ионосферы [1]. В естественных и в искусственно-возмущенных геофизических условиях ионосферная турбулентность обычно распределена не равномерно, а сосредоточена в локализованных крупномасштабных неоднородностях электронной плотности, движущихся под воздействием ионосферных ветров. Крупномасштабная неоднородность может обладать как регулярными свойствами, так и представлять собой полностью турбулентное плазменное облако. В настоящее время активно развивается метод детектирования регулярных крупномасштабных неоднородностей приземной плазмы путем ее зондирования декаметровыми радиосигналами с низкоорбитальных искусственных спутников Земли (ИСЗ) [2]. Использование декаметровых радиоволн имеет важное преимущество по сравнению с другими частотными диапазонами, поскольку в данном случае зондирование проводится на рабочих частотах, близких к критическим частотам ионосферы. Это обеспечивает высокую чувствительность метода к неоднородностям плазмы и позволяет более точно восстанавливать структуру ионосферы. Метод детектирования крупномасштабной неоднородности [2] предполагает прямой численный синтез возмущенных дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) на трассах космический аппарат-Земля. Местоположение и параметры крупномасштабной регулярной неоднородности определяются по изменениям относительных групповых задержек трансionoсферных сигналов ИСЗ. Определяя пространственные размеры крупномасштабной неоднородности с помощью синтеза ДЧХ, можно переходить к диагностике параметров ее тонкой турбулентной структуры. Между тем возможны геофизические условия, когда крупномасштабная неоднородность полностью теряет регулярные свойства и трансформируется в турбулентное облако плазмы, которое не приводит к дополнительной регулярной рефракции прошедших радиоволн. В результате крупномасштабная неоднородность становится "невидимой" на усредненных трансionoграммах, где проявляются регулярные вариации групповой задержки радиосигнала, вызванные ионосферой. В этом случае для определения области локализации крупномасштабного облака турбулентной плазмы необходимо изначально использовать данные измерений флуктуационных характеристик трансionoсферных радиосигналов на различных рабочих частотах.

В настоящей работе показана возможность определения параметров тонкой турбулентной структуры изолированной крупномасштабной неоднородности электронной концентрации по статистическим траекторным моментам трансionoсферных декаметровых радиосигналов. Локализация крупномасштабной неоднородности проводится с помощью численно-аналитического синтеза дистанционно-частотных характеристик [3]. Для диагностики тонкой структуры неоднородности получены аналитические выражения для статистических моментов траекторных характеристик радиосигналов на различных рабочих частотах.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (гос.задание №3.9678.2017/БЧ)

1. Плазменная гелиогеофизика. Т.2/ Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 560 с.
2. Данилкин Н.П. и др. // Гелиогеофизические исследования.- 2012, Вып. 1. С.42.
3. Afanasiev N.T., Markov V.P. // Geomagnetism and Aeronomy.- 2011. V. 51, No. 4. P. 564.

ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ТОКОВ НАТЕКАНИЯ В ПОЛУДЕННОМ И ПОЛУНОЧНОМ СЕКТОРАХ MLT В КЭ "ИМПУЛЬС-1" НА РС МКС

Лисаков Ю.В.

Институт космических исследований РАН, г. Москва, E-mail: ylissako@iki.rssi.ru

На Российском сегменте МКС в космическом эксперименте (КЭ) "Импульс 1" (ИЗМИРАН) прибором ККЭП (Комплекс Контроля Электрических Параметров) проводились измерения токов натекания на плоские зонды и измерения квазистационарного электрического поля датчиками вибрационного типа.

В [1-8] приведены параметры приборного комплекса и общие, постоянно наблюдавшиеся характерные особенности измеряемых токов и полей при движении КА в слое F2 ионосферы Земли.

Из имеющихся 170 сеансов телеметрических данных (более 11000 часов измерений выполненных, в период 12.02.2010 – 21.01.2011гг.) анализировались две серии измерений, охватывающие только около полуденные ("подкаспенные") и около полуночные (разрыв Харанга) секторы MLT на геомагнитных широтах выше 60°L0. Одна серия приходилась на период осеннего равноденствия, вторая - на бестеневую орбиту.

В ночной ионосфере в независимости от высоты тени на фоне не больших положительных токов вблизи полуночного меридиана наблюдаются небольшие структуры. В дневной ионосфере измеряемые токи существенно положительные, непосредственно вблизи меридиана наблюдается резкий скачок тока.

Измеряемые квазистационарные электрические поля в ночной ионосфере имеют нарастающие отрицательные значения, достигая максимума вблизи полуночного меридиана и далее постепенно возвращаясь к нулевому уровню. В дневной ионосфере электрические поля положительные, непосредственно вблизи полуденного меридиана наблюдаются заметные увеличения поля.

Анализ измерений токов и полей во всех сеансах обеих серий подтверждает общий характер поведения исследуемых параметров в рассматриваемых секторах MLT.

С учетом специфики МКС (сверхбольшие размеры КА, сложнейшая пространственная конфигурация) подобные измерения, тем не менее, вполне пригодны для мониторинговых исследований некоторых особенностей ионосферы на уровне слоя F2 с временным масштабом от 1 с.

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НАД НАГРЕВНЫМ СТЕНДОМ СУРА

Сергеев Е.Н., Шиндин А.В., Караштин А.Н., Грач С.М.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, esergeev@nirfi.unn.ru

Исследование пространственной структуры области искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), создаваемой в экспериментах по модификации плазмы с помощью мощного КВ радиоизлучения на нагревных стендах, проводится с помощью измерений характеристик искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). Изучение высотной структуры ИИТ, вытянутой вдоль геомагнитного поля, проводится с помощью использования одного из передатчиков стенда в качестве импульсного КВ-радар на сдвинутой до 1 МГц относительно волны накачки частоте. Генерируемое диагностическими импульсами ($\tau_{\text{и}}=20\text{-}200$ мкс, $T_{\text{и}}=20\text{-}200$ мс) ИРИ при зондировании области ИИТ несет информацию о характеристиках возбуждаемых плазменных волн и неоднородностях плотности плазмы на стадиях развития и релаксации турбулентности на разных высотах. Реализовать схему одновременных многочастотных диагностических измерений в полосе до 1 МГц достаточно сложно с технической точки зрения.

В работе исследуются возможности использования мощных естественных коротких (~ 100 мкс) широкополосных (до 10 МГц) радиоимпульсов молниевых разрядов для диагностики области ИИТ на всем ее высотном протяжении. Ожидается обнаружение генерации ИРИ от таких импульсов, которое может быть зарегистрировано по их окончании на стадии релаксации генерируемых ими плазменных волн. Диагностика ИИТ возможна также по сопоставлению ионограмм, получаемых по отраженному от ионосферы широкополосному грозовому радиоизлучению методом корреляционного анализа при нагреве ионосферы и его отсутствии.

В настоящее время разработана и реализована методика непрерывного мониторинга грозовой активности над нагревным стендом СУРА по сети Интернет и дистанционной регистрации радиоизлучения молниевых разрядов и стенда, создана база данных в полосе регистрации 0.8-10 МГц для 4-х дней наблюдений: 16 и 18 мая 2018 г., 10 июня и 16 августа 2019 г. Во время грозы использован режим чередования квазинепрерывного нагрева ($\tau_{\text{и}}=70\text{-}170$ мс, $T_{\text{и}}=0.1\text{-}0.2$ с) в течение 2-4 минут для создания ИИТ и постоянного зондирования 100-мкс импульсами в течение 5-8 минут.

Наиболее перспективными для анализа представляются данные за 18 мая 2018 г. В период с 21:05 по 21:55 мск. зарегистрировано более 60 разрядов молний, из них 32 – интенсивных. Интегральная интенсивность радиоизлучения молниевых разрядов вблизи стенда (~ 30 км) оказалась сравнимой с сигналами стенда СУРА, работавшего на частоте 4.3 МГц. Равномерно распределенная по спектру в полосе 10 МГц интенсивность отдельных спектральных компонент грозового радиоизлучения на 40 дБ превышала уровень шумов эфира, в то время как такое превышение для импульса волны накачки составляет 60-100 дБ. Полная длительность разрядов варьировалась от 100 мс до 1 с, однако резкий фронт окончания разряда (< 1 мс) не наблюдался. Это не позволило пока оценить уровень как отраженного от ионосферы радиоизлучения разряда, так и возможно генерируемого “грозового” ИРИ в условиях нагрева ионосферы. В 2020 г. для исследования возможного влияния генерируемых молнией потоков заряженных частиц на нижнюю ионосферу будет применяться мониторинг характеристик искусственных периодических неоднородностей в D- и E-слое, а также спорадического E-слоя.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 19-02-00343.

Инструмент для визуального анализа спутниковых измерений в поисковых задачах (на примере задачи выявления возмущений низкочастотных сигналов, регистрируемых в области нагрева передатчика HAARP на микроспутнике DEMETER)

Корнева Н.Н., Могилевский М.М., Назаров В.Н.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nkorneva@romance.iki.rssi.ru

Выявление (поиск) и изучение возмущений нестационарных сигналов, предположительно связанных с тем или иными событиями, распространенная и часто возникающая задача при интерпретации результатов научного космического эксперимента. Характерной особенностью данной задачи, является отсутствие строгой формализации критериев поиска, а, следовательно, требуемый анализ не может быть выполнен полностью в автоматическом режиме. Роль ученого в этом случае заключается не только в интерпретации измерений, но и в решении целого ряда задач, напрямую не связанных с исследованием. К наиболее трудоемким из них относятся: выбор и изучение инструмента анализа данных, а также подготовка исходных данных. При этом зачастую для анализа одного и того же набора данных требуется использовать различные инструменты, т. к. не один из них не предоставляет в полной мере требуемой функциональности. Как следствие, одни и те же наборы данных и промежуточные результаты приходится хранить в различных форматах.

В настоящей работе рассматривается разработанный инструмент (программный продукт), автоматизирующий процесс анализа измерений на предмет выявления возмущений сигнала, предположительно связанных с теми или иными событиями. Работа инструмента обсуждается на примере задачи выявления возмущений низкочастотных сигналов, регистрируемых в области нагрева передатчика HAARP на микроспутнике DEMETER.

ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАМАГНИТНЫХ КАВЕРН И НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ ПРИ РАСШИРЕНИИ ПЛАЗМЕННЫХ ОБЛАКОВ ВО ВНЕШНЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И В ФОНОВУЮ ПЛАЗМУ

Николенко А.С., Гущин М.Е., Коробков С.В., Гундорин В.И., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Стриковский А.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, nikolenko@ipfran.ru

Представлены результаты экспериментов по инъекции плотных плазменных облаков, созданных малогабаритными импульсными коаксиальными генераторами плазмы [1], в вакуум и в фоновую плазму большого объёма во внешнем магнитном поле. Исследования проводились на стенде «Крот», позволяющем реализовать режим «безграничной» фоновой плазмы, на котором возможно изучение динамики плазменных облаков на масштабе порядка одного метра вдоль и поперек квазиоднородного магнитного поля. Данный режим позволяет приблизить условия моделирования к условиям, реализуемым в активных ионосферных экспериментах [2]. Максимальная концентрация фоновой плазмы (в момент создания) составляет $n_0 \sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, плазма распадается за характерное время порядка 3 мс. Для создания облаков плотной плазмы были изготовлены коаксиальные пушки на основе отрезков коаксиальной линии с полиэтиленовой изоляцией, подключенных к ёмкостному накопителю энергии. Повторяемость параметров плазмы от одного «выстрела» к другому достаточно высока – не хуже 10%.

С помощью магнитных зондов исследованы сильные магнитные возмущения, сопровождающие инъекцию плазмы в вакуум и в фоновую плазму во внешнем магнитном поле величиной 50 – 450 Гс, включая образование диамагнитной каверны. Полное вытеснение магнитного поля наблюдалось при значениях индукции последнего вплоть до 200 Гс. Качественно исследованы различия между случаями инъекции в вакуум и в фоновую плазму, а также особенности динамики плазмы в двух ориентациях инъекции – вдоль и поперек фонового магнитного поля. Установлены характерные размеры каверн, характеристики торможения облака внешней средой. Помимо зондовых диагностик использовалась скоростная фотокамера, данные с которой содержат информацию о динамике плазмы.

Обнаружено, что на ранней стадии инъекции плазменного облака возбуждаются достаточно интенсивные электромагнитные шумы, регистрируемые магнитными зондами, причем интенсивность шумов тем больше, чем выше начальная плотность инжектируемого плазменного облака. Амплитуда шумов составляет до 40% от величины вытесненного магнитного поля. Шумы локализованы преимущественно на стенке диамагнитной каверны, они возбуждаются в полосе 0.1 – 10 МГц, соответствующей нижнегибридному диапазону. На стадии распада плазменного облака наблюдается структурная неустойчивость, присущая активным экспериментам в ионосфере – филаментация плазменного облака в направлении поперёк внешнего магнитного поля.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-02-00850-а.

1. Коробков С.В., Гущин М.Е., Гундорин В.И., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Стриковский А.В., Николенко А.С. // Письма в ЖТФ 2019. Т.45. №5. С. 45.

2. Гущин М.Е., Коробков С.В., Терехин В.А., Стриковский А.В., Гундорин В.И., Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Николенко А.С. // Письма в ЖЭТФ 2018. Т. 108. № 5-6. С. 416.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СБОЕВ В ФАЗОВЫХ ДАННЫХ ГНСС И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗМЕРЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ

Минасян Г.Г., Илюшин Я.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, minasyangg.msu@yandex.ru

Сигналы радиомаяков глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС), прошедшие через атмосферу Земли, являются источником ценной информации для исследований верхней и нижней атмосферы. В зарегистрированных сигналах могут возникать разрывы, шумы и сбои сопровождения фазы различной природы, обусловленные условиями распространения сигнала и различными нарушениями в работе аппаратуры. Для выявления и устранения указанных помех перед дальнейшим анализом этих данных необходима соответствующая их предобработка. Кроме того, статистика сбоев, причины их возникновения и их связь с различными факторами представляют самостоятельный интерес для исследования.

На основе анализа фазовых данных глобальной навигационной спутниковой системы, получены распределения временных производных по фазовой частоте L1 и полному электронному содержанию. Проанализировано изменение распределений наблюдаемой статистики временных производных полного электронного содержания в результате сбоев фазы сигналов навигационных спутников.

Используя данные записи сигналов спутниковых радиомаяков на двух рабочих частотах навигационной системы GPS, были рассчитаны первая и вторая производные по времени для величин L1 и ПЭС на двух временных интервалах по 15 и 30 секунд. Исследована их статистика в период с 2015.06.01(день 152) по 2015.06.30(день 181) для всех измерений по более чем 2000 станциям и 32 спутникам за одни сутки. Для более подробного исследования поведения распределения производных L1 и ПЭС были построены гистограммы на нескольких аналитически значимых диапазонах, полученных в ходе расчетов. По результатам анализа статистики фазы сигналов сформулировано предположение о физических и технических причинах сбоев фазы. Получено корреляционное соотношение временных производных фазового сигнала и полного электронного содержания, несмотря на явную зависимость последнего от фазы сигнала. Данное соотношение показало, что ни прямой, ни обратной зависимости изменения распределений временных производных по обеим из величин не обнаружено.

Исследование частично поддержано грантом Российского Научного Фонда 17-77-20087 “Исследование длиннопериодных возмущений в ионосфере, нижней атмосфере и океане методами GNSS-зондирования”.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ, РАЗВИВАЮЩИХСЯ ПРИ ЕЕ ИМПУЛЬСНОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОМ НАГРЕВЕ

Коробков С.В., Зудин И.Ю., Гущин М.Е., Николенко А.С., Стриковский А.В.,
Айдакина Н.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, aidakina@appl.sci-nnov.ru

Искусственные плазменные неоднородности могут формироваться в искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ), которая возбуждается при воздействии высокочастотных нагревных стенов, таких как HAARP, EISCAT, и SURA [1,2], при воздействии ОНЧ передатчиков [3] и мощных передатчиков, установленных на борту космических аппаратов [4]. Исследование динамики таких неоднородностей представляет большой интерес, как для построения моделей геофизических процессов, так и для интерпретации результатов активных экспериментов в околоземной плазме.

В данном докладе представлены результаты новой серии лабораторных экспериментов по локальному высокочастотному нагреву плазмы во внешнем магнитном поле, которые проводились на уникальном крупномасштабном стенде «Крот» (ИПФ РАН, г. Н. Новгород). Впервые исследована динамика не только плотности плазмы [5,6], но и одновременная динамика магнитного поля, электрических токов и электронной температуры. Возмущения плотности плазмы исследовались с помощью зонда с СВЧ-резонатором [5,6]. Структура возмущений магнитного поля и тока была получена из измерений магнитными зондами, электронная температура и функция распределения электронов по энергиям определялись с использованием электрического зонда. Показано, что в соответствии с нашими более ранними исследованиями, в плазме в результате локального нагрева, имеет место быстрый «униполярный» режим переноса частиц, который сопровождается формированием областей увеличения и обеднения плотности плазмы и возбуждением системы вихревых электрических токов [5,6]. Одновременные измерения магнитных полей, выполненные при тех же параметрах, позволяют восстановить структуру возбуждаемых вихревых токов и сопоставить ее со структурами плотности. Один из наиболее интересных результатов был получен в ходе исследования крупномасштабной динамики электронной температуры. В результате мощного импульсного нагрева, на начальном этапе воздействия в плазме, по-видимому, формируется надтепловая популяция электронов. Интерес вызывает как самостоятельная эволюция такой популяции электронов, так и ее влияние на динамику перераспределения плотности в ходе последующего нагрева плазмы. Полученные результаты обсуждаются в докладе применительно к результатам более ранних лабораторных исследований, а также к активным ионосферным экспериментам.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №18-32-00721-мол_a).

1. Frolov V.L., Bolotin I.A., Komrakov G.P., Glukhov Y.V., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E., Kurbatov G.A. // Heliogeophys. Res. 2015. V. **13**. P. 49.
2. Grach S.M., Sergeev E.N., Mishin E.V., Shindin A.V. // Phys. Usp. 2016. V. **59**. P. 1091.
3. Sonwalkar V. S., Inan U. S., Bell T. F., Helliwell R. A., Chmyrev V. M., Sobolev Y. P., Ovcharenko O. Y., Selegej V. // J. Geophys. Res. 1994. V. **99**(A9). P. 17511.
4. Pulinets S.A., Selegej V. V. // J. Atmos. Terr. Phys. 1986. V. **48**. P. 149.
5. Aidakina N., Gushchin M., Zudin I., Korobkov S., Strikovskiy A. // Physics of Plasmas. 2018. V. **25**. P. 072114.
6. Aidakina N., Gushchin M., Zudin I., Korobkov S., Strikovskiy A. // Physics of Plasmas. 2018. V. **25**. P. 122104.

ПЛАЗМЕННО-ПЫЛЕВЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛА ЧЕРЕЗ ИОНОСФЕРУ ЗЕМЛИ

Т.И. Морозова, С.И. Попель

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, timoroz@yandex.ru

Рассмотрены пылевые плазменные процессы, связанные с прохождением метеоров в ионосфере Земли. Предложены механизмы, объясняющие возникновение электронного шума, регистрируемого одновременно с прохождением метеоров, связанные с модуляцией электромагнитной волны от метеора пылевыми звуковыми колебаниями. Показано, что пылевые звуковые колебания возбуждаются при прохождении электромагнитной волны через пылевую плазму хвоста метеора или через плазму запыленной ионосферы Земли. Они модулируют радиоволны от метеоров на частотах, характерных для пылевой звуковой моду (0.03-60 Гц). На поверхности Земли эти возмущения преобразуются в звуковые волны через приемники и воспринимаются наблюдателями как звук, который происходит одновременно с прохождением метеора. Посчитаны инкременты модуляционной неустойчивости, при которых происходит модуляционное возбуждение низкочастотных пылевых звуковых возмущений. Приведены условия развития модуляционной неустойчивости. Показано, что наблюдается корреляция с наблюдениями шумов от метеоров в данном диапазоне частот.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-00005).

РЕАКЦИЯ ФОНОВОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ НА НАГРЕВ МОЩНЫМ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Ю.К. Легостаева, А.В. Шиндин, С.М. Грач

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, julilegostaeva@gmail.com

Представлены результаты численного моделирования динамики яркости свечения в красной линии атомарного кислорода с длиной волны 630 нм вследствие нагрева ионосферы. Моделирование проводилось на основе системы, включающей в себя уравнение для электронной температуры T_e (уравнение теплопроводности) с локализованным источником нагрева вблизи точки отражения волны накачки; уравнение баланса концентрации ионов молекулярного кислорода O_2^+ , возникающих вследствие реакции перезарядки между ионами атомарного кислорода O^+ и молекулами кислорода O_2 , и исчезающих вследствие диссоциативной рекомбинации при столкновениях с электронами; а также уравнение для концентрации атомов кислорода в возбужденном состоянии $O(^1D)$, возникающими вследствие диссоциативной рекомбинации и исчезающими (переходящими в основное невозбужденное состояние) вследствие излучения квантов на длине волны $\lambda=630$ нм и реакции гашения вследствие столкновений с молекулами азота N_2 и кислорода O_2 . Использовались распределения молекулярного (O_2) и атомарного (O) кислорода по высоте, взятые из эмпирической модели атмосферы NRLMSISE-00 и профиль электронной концентрации N_e , взятый из модели International Reference Ionosphere (IRI), модифицированный с учетом данных экспериментов 9, 10 сентября 2010 г. и 14 сентября 2012 г. на стенде СУРА.

Показано, что в рамках используемой модели включение мощной радиоволны (нагрева электронов) приводит к подавлению фонового свечения ионосферы из-за уменьшения коэффициента диссоциативной рекомбинации $\alpha(T_e) \propto T_e^{-1/2}$ и, следовательно, к уменьшения концентрации возбужденных атомов $O(^1D)$. Однако по прошествии некоторого характерного времени фоновый уровень свечения начинает восстанавливаться из-за дезактивации в результате излучения и гашения, и при длительном нагреве достигает исходного уровня B_0 . В условиях эксперимента, проведенного 09.09.2010 г. выключение нагревного стенда происходило до достижения исходного уровня B_0 . При этом после выключения стенда темп восстановления яркости увеличивается и наблюдается так называемый эффект послесвечения, т.е. рост яркости выше стационарного уровня фона, с дальнейшим уменьшением к стационарному уровню B_0 . Характерные времена подавления яркости фона после включения волны накачки, а также нарастания и уменьшения яркости после ее выключения, полученные при моделировании, соответствуют данным эксперимента. В то же время, «размах» (амплитуда) вариаций яркости оказался заметно меньше наблюдаемого. Для более точного совпадения результатов моделирования с экспериментов требуется более тщательный подбор параметров моделирования источника нагрева (его высотный размер и амплитуда электрического поля волн, нагревающих электроны), а также учёт реальных профилей электронной концентрации, имевших место во время эксперимента.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18-02-00622, 20-32-70198.

СТАТИСТИКА НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРИМЕНИМОЙ ЧАСТОТЫ НА ТРАССЕ ГОРЬКОВСКАЯ - ЛОВОЗЕРО

Мальцева О.А., Никитенко Т.В.

НИИФ ЮФУ, г. Ростов-на-Дону, Россия, mal@ip.rsu.ru

В настоящее время существенно повысился интерес к высокоширотной ионосфере, ответственной за распространение радиоволн КВ диапазона. Несмотря на широкое использование спутниковой связи, КВ-связь не утратила своего значения, особенно в высокоширотных областях. Это имеет прямое отношение к методу наклонного зондирования. Однако ситуация здесь не является идеальной: необходимы дополнительные усилия для экспериментальных исследований и повышения точности определения параметров с помощью эмпирических моделей ионосферы. Особенно это относится к условиям низкой солнечной активности, когда ученые столкнулись с повышенной неточностью моделей. Целью работы является получение экспериментальных данных и их сравнение с наиболее распространенной моделью IRI. В работе используются данные графиков суточных ходов параметров ионосферы foF2, hmF2 двух станций Горьковская (60.27°N, 29.38°E), Ловозеро (67.97°N, 35.02°E) и значения максимальной применимой частоты МПЧ на трассе Горьковская- Ловозеро длиной D~900 км, загруженные на сайте ААНИИ (<http://geophys.aari.ru/>), за период с мая 2017 по апрель 2018. В качестве модели IRI использовалась online версия IRI2016, чтобы избежать неточностей, связанных с введением новых солнечных индексов. При сравнении модельных и экспериментальных данных основное внимание уделялось простому и достаточно надежному способу определения МПЧ по характеристикам в середине трассы: $МПЧ(D) = MD * foF2(D/2)$, который справедлив для коротких трасс. Коэффициент MD получался пересчетом M3000(IRI) на длину D=900 км. Тестировалось несколько вариантов, которые возможны в реальной ситуации. Во-первых, отсутствие любых априорных экспериментальных данных. В этом случае $МПЧ(D) = MD(IRI) * foF2(IRI)$. Во-вторых, могут быть значения критических частот foF2 на концах трассы. Тогда самый простой способ заключается в определении полусуммы этих значений. Третий вариант связан с использованием полного электронного содержания ТЕС ионосферы. В данном случае имелись foF2 на концах трассы. Для расчета ТЕС использовалась карта GIM-JPL из файлов IONEX на сайте <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/gps/products/ionex/>. Получено, что все 3 опции дают близкие результаты. В зимнее время все опции переоценивают экспериментальные МНЧ, в весенние и летние месяцы – недооценивают. В суточном ходе наибольшие отклонения наблюдаются в утренние часы. Количественные характеристики сводятся к следующему. Средние абсолютные отклонения МПЧ для модели IRI лежат в диапазоне 0.92- 1.36 МГц. При использовании ТЕС диапазон оказался таким же. При использовании данных вертикального зондирования 1.0-1.13 МГц. Соответствующие СКО лежат в диапазоне 15.8-17.5 % для модели IRI, 14.6-23.1 % при использовании ТЕС и 16.6-17.9 % для ВЗ. Таким образом, модель IRI возможно использовать не только в режиме адаптации к параметрам текущей диагностики в методе ray tracing, но и при определении коэффициента распространения и критической частоты в середине трассы. Метод использования ТЕС для определения foF2, хорошо проявивший себя в условиях высокой солнечной активности, привел к достаточно заниженным результатам. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 18-05-00343А).

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА МОМЕНТОВ ТРАЕКТОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНЫХ РАДИОВОЛН

Афанасьев Н.Т.¹, Чудаев С. О.²

¹ИГУ, г. Иркутск, Россия, spacemaklay@gmail.com

²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия.

Как известно, расчет вероятностных траекторных характеристик радиоволн, распространяющихся в ионосфере можно выполнить с помощью численного моделирования, задавая отдельные реализации параметров ионосферы, посеянных датчиком случайных чисел. Для каждой реализации среды находятся решения детерминированных дифференциальных уравнений для траекторных характеристик радиоволн при заданной дистанции между пунктами приема и излучения. Набирая ансамбль реализаций траекторных характеристик радиоволн и проводя усреднение по всем реализациям, можно получить статистические моменты этих характеристик. Однако, такой способ расчета требует значительных затрат компьютерного времени, неустойчив и для высокой точности пристрелки траекторий трудно реализуем.

Значительные результаты в лучевой теории ионосферного распространения радиоволн были получены благодаря использованию представления об ионосфере, как случайном поле неоднородностей [1]. Применение асимптотических разложений в исходных стохастических дифференциальных уравнениях, описывающих траектории ионосферных радиоволн, позволяет сделать вывод приближенных функциональных соотношений между характеристиками радиоволн и параметрами ионосферных неоднородностей. Обычно эти соотношения представляют собой сложные математические конструкции и для их расчета требуется создание специальных вычислительных схем [2]. Разработанный в [2] численно-аналитический алгоритм расчета флуктуационных характеристик направления распространения ионосферных радиоволн позволяет обойти проблему неустойчивости решения стохастической траекторной задачи методом Монте-Карло.

В настоящей работе метод, предложенный в [2], развит для расчета совокупности статистических траекторных характеристик ионосферных радиоволн. На основе прямого разложения Пуанкаре получена система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для одновременного расчета средних значений, дисперсий и функций взаимной корреляции фазы, направления прихода, доплеровского смещения частоты и групповой задержки ионосферных радиоволн. В качестве модели случайной изменчивости ионосферы использована корреляционная функция, характеризующая квазиоднородное по пространству и по времени случайное поле неоднородностей. Движение хаотических ионосферных неоднородностей учтено в рамках гипотезы о переносе замороженной турбулентности. Полученная система дифференциальных уравнений для моментов траекторных характеристик радиоволн использована при построении инвертора, позволяющего восстановить неизвестные статистические параметры пространственно-временных ионосферных неоднородностей.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (гос.задание №3.9678.2017/БЧ)

1. Кляцкин В.И. Стохастические уравнения: теория и ее приложения к акустике, гидродинамике и радиофизике. М.: Физматлит, 2008. Т. 1. 317 с.
2. Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Ким Д.Б., Чудаев С.О. // Современные наукоемкие технологии.-2019. № 2. С. 9.

ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЕ БИЕНИЯ НА СЛЕДАХ ТРАНЗИЕНТНОГО СПОРАДИЧЕСКОГО СЛОЯ E

Юсупов К.М., Акчурин А.Д., Шерстюков О.Н.

КФУ, г. Казань, Россия, kamil.usupov@kpfu.ru

Короткоживущие или транзистентные слои Es [1;2] являются наименее изученными объектами спорадической ионизации в области E. Малое время жизни (от 1 минуты) не позволяет объяснить их возникновение в рамках теории ветрового сдвига, которая предполагает сгонку ионов с характерным временем в E-области, определяемым величиной, обратной произведению эффективного коэффициента рекомбинации и электронной концентрации. Это время в разных условиях составляет 30-60 секунд и более.

Основные результаты данной работы показывают редкие особенности транзистентных слоев Es, а именно их интерференционные биения на следах ионограмм вертикального зондирования ионозонда «Циклон», который расположен в радиофизической обсерватории Казанского Федерального Университета. Ранее в работе [3] были исследованы и показаны особенности интерференционных биений на следах слоя Es, и установлены причины их появления по типу O-X и O-Z компонент. В случае транзистентных Es расщепление сигнала на компоненты не возможны в связи с недостаточными условиями для их возникновения. Так в работе [4] на основе наблюдений на ОВЧ/УВЧ метеорного радара показываются биения на RTI-имидже из-за деления метеороида на фрагменты, поэтому это и будет являться наиболее вероятной причиной появления биений на следах транзистентного Es.

Таким образом, в этой работе рассматриваются типичные для средних широт частотный шаг биений транзистентного Es и расстояние между фрагментами метеороида.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-35-00442.

1. Maruyama, T., H. Kato, and M. Nakamura (2003), Ionospheric effects of the Leonid meteor shower in November 2001 as observed by rapid run ionosondes, J. Geophys. Res., 108(A8), 1324, doi:10.1029/2003JA009831.

2. Maruyama, T., H. Kato, and M. Nakamura (2008), Meteor-induced transient sporadic E as inferred from rapid-run ionosonde observations at midlatitudes, J. Geophys. Res., 113, A09308, doi:10.1029/2008JA013362.

3. Акчурин А.Д., Юсупов К.М. Частотные свойства квазипериодических биений на АЧХ среднеширотного слоя Es. Ученые записки Казанского университета. Серия: Физико-математические науки. 2011. Т. 153. № 1. С. 7-16.

4. Mathews, J. D., S. J. Briczinski, A. Malhotra, and J. Cross (2010), Extensive meteoroid fragmentation in V/UHF radar meteor observations at Arecibo Observatory., Geophys. Res. Lett., 37, L04103, doi:10.1029/2009GL041967.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИНТЕНСИВНОГО ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ : НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ MMS В ОКРЕСТНОСТИ СЕПАРАТРИСЫ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЯ В МАГНИТОСФЕРЕ.

Сергеев В.А.¹, С.В. Апатенков¹, Р.Накамура², Ф. Плашке², В.Баумйоханн²

1- СПбГУ, г.Санкт-Петербург, Россия, victor@geo.phys.spbu.ru

2- Институт Космических Исследований Австрийской АН, г.Грац, Австрия

Хотя современные схемы развития магнитосферной суббури существенно опираются на представления о развитии магнитного пересоединения в хвосте магнитосферы, надежные измерения последнего трудноосуществимы, так что в основном наши представления основаны на интерпретации косвенных наблюдательных данных и отдельных результатов МГД моделирования. Одной из задач проекта MMS должна быть экспериментальная проверка макроскопических последствий пересоединения при действительном измерении параметров пересоединения с помощью многоспутникового эксперимента.

В событии суббури 28.07.2017г эпизод длительного (11мин) интенсивного пересоединения на расстоянии $< \sim 5R_E$ от XNL наблюдался спутниками MMS в окрестности сепаратрисы при одновременном контроле в магнитосопряженной области ионосферы высыпаний авроральных и энергичных электронов (спутником Metop-2) и динамики западной электроструи (по магнитным измерениям сети IMAGE). Впервые по уникальным координированным измерениям показано (Sergeev et al. GRL 2019), что в условиях интенсивного пересоединения при скорости ~ 3 мВ/м расширение к полюсу западной электроструи (полярной границы овала) происходит со скоростью $\sim 1^\circ$ в минуту в согласии с оценками пересоединенного магнитного потока, а в области ионосферной проекции XNL регистрируется мощное высыпание авроральных электронов (> 130 эрг/сек см²) с жестким спектром. Анализ заполнения конуса потерь энергичных электронов подтвердил генерацию указанной структуры в тонком токовом слое (где происходит заполнение конуса ионосферных потерь при однократном пересечении токового слоя), тогда как основная толща аврорального выступа (и области электроструи) к экватору от яркой дуги расположена в диполизированных магнитных трубках плазменного слоя (где отсутствует неадиабатическое рассеяние электронов и конуса потерь пуст).

Установление пространственной организации характеристик плазмы и электромагнитных возмущений вблизи сепаратрисы пересоединения (проекции линии пересоединения, XNL) на разных расстояниях от XNL является важным аспектом, интересным с точки зрения возможной дистанционной оценки параметров пересоединения.

Для этой цели развита методология оценки расстояния до XNL по совокупности данных о дисперсии ионных пучков, о скорости конвекции плазмы и скорости движения фазовых фронтов (границ) магнитной структуры по измерениям системы спутников MMS. Предварительный анализ показал, что основные элементы структуры возмущений вблизи сепаратрисы (пучки электронов, горячих ионов, границы термализации холодных ионов, продольных токов, и их взаиморасположение воспроизводятся вплоть до больших удалений от XNL превышающих $30 R_E$, причем следы интенсивного поперечного поля EZ напоминающего Холловское поле в окрестности XNL, могут простираются на расстояния $> 100 R_E$. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-47-05001.

Sergeev, V. A., Apatenkov, S. V., Nakamura, R., Baumjohann, W., Khotyaintsev, Y. V., Kauristie, K., et al. (2019), Substorm-related near-Earth reconnection surge: Combining telescopic and microscopic views, *Geophysical Research Letters*, 46, 6239-6247, DOI: 10.1029/2019GL083057

РЕКОНСТРУКЦИЯ ДОЛГОТНОЙ ДИНАМИКИ ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ ИНЖЕКТИРОВАННЫХ ВО ВНУТРЕНнюю МАГНИТОСФЕРУ ПРИ СУББУРЕВОЙ ИНЖЕКЦИИ.

Сергеев В.А.¹, М.А. Шухтина¹, Н.А. Степанов^{1,2}, Д.Д. Рогов², А.В. Николаев², Э. Спансвик³, Э. Донован³, Т. Райта⁴, А. Керо⁴

1- СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, victor@geo.phys.spbu.ru

2- ФГБУ «ААНИИ», г. Санкт-Петербург, Россия

3- Университет Калгари, г. Калгари, Канада

4- Геофизическая Обсерватория Соданкюла, Соданкюла, Финляндия

В дополнение к существующим статистическим моделям, описывающим средние распределения высыпаний энергичных электронов при разных уровнях активности, мы развиваем полуэмпирический подход для выделения повторяющихся черт пространственно-временной динамики аврорального поглощения в ионосфере вызываемого высыпаниями энергичных электронов во время суббурь.

Его основными элементами являются: (а) применение методики линейных фильтров (linear prediction filters, LPF) для выделения функции отклика аврорального поглощения в данном секторе MLT на инжекцию единичной амплитуды, и (b) использование для характеристики времени и интенсивности инжекций недавно предложенного магнитного индекса МРВ, выделяющего на средних широтах эффекты диполизаций, создаваемых при развитии токового клина суббури.

На основе сопоставлений рядов МРВ индекса и многолетних измерений риометрами в Канаде в центре авроральной зоны (на 65-67°CGMLat) в периоды изолированных суббурь, мы построили количественную модель долготного развития аврорального поглощения соответствующего эффектам кратковременной инжекции электронов. Динамическая модель выделяет краткое интенсивное высыпание в ночном секторе (22 and 02h MLT), последующее регулярное расширение высыпаний к востоку соответствующее магнитному дрейфу энергичных (~50кэВ) электронов, формирование длительного утреннего максимума высыпаний (с пиком на ~07-08ч. MLT), а также незначительные высыпания в послеполуночном-вечернем секторе.

Анализ подтвердил успешность разрабатываемого подхода. Из анализа также следует что, помимо интенсивности диполизации/инжекции, интенсивность высыпаний зависит от характеристик фоновых электронов, задаваемых характеристиками солнечного ветра. Мы приведем результаты валидации метода и обсудим его дальнейшее развитие. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-05-00072.

GLOBAL MAGNETOTAIL DIPOLARIZATION AND IONOSPHERIC CURRENTS BY BURSTY BULK FLOWS DURING AN ISOLATED SUBSTORM

Панов Е.В.¹, Меркин В.Г.²

¹*Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences, Graz, Austria,
evgeny.panov@oeaw.ac.at*

²*The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Laurel, MD, USA.*

By means of Magnetospheric Multiscale, Geostationary Operational Environmental and Los Alamos National Laboratory satellites, as well as the ground magnetometer networks over Greenland and North America we study the magnetotail and ionospheric dynamics during an isolated substorm on 9 August 2016 between 9 and 10 UT. We find that during the substorm two earthward flows, whose dipolarization-injection fronts exceeded 6.5 and 4 Earth's radii (R_E) in Y_{GSM} , impinged and rebounded from Earth's dipolar field lines at the geosynchronous orbit. The impingements and rebounds ended with a substorm current system of downward R1 and upward R2 currents which grew to azimuthally cover the whole North American continent. At the fronts, regions of enhanced negative $\mathbf{j} \cdot \mathbf{E}'$ (generator) were formed and peaked toward the end of the impingements. These regions appeared to be conjugate to R2 auroral current (load). We further employ the high-resolution Lyon-Fedder-Mobarry global magnetosphere magnetohydrodynamic model and simulate the substorm event. The results of our simulations reveal that plasma sheet flow channels (bursty bulk flows, BBFs) and elementary dipolarizations (dipolarization fronts, DFs) occur in the growth phase of the substorm but are rare and do not penetrate to the geosynchronous orbit. The substorm onset is characterized by an abrupt increase in the occurrence and intensity of BBFs/DFs, which penetrate well earthward of the geosynchronous orbit during the expansion phase. These azimuthally localized structures are solely responsible for the global (in terms of the magnetic local time) dipolarization of the inner magnetosphere toward the end of the substorm expansion. Additionally, the simulation reveals many previously observed signatures of BBFs and DFs, including overshoots and oscillations around their equilibrium position, strong rebounds and vortical tailward flows, and the corresponding plasma sheet expansion and thinning.

[1] Panov, E. V., Baumjohann, W., Nakamura, R., Weygand, J. M., Giles, B. L., Russell, C. T., et al. (2019). Continent-wide R1/R2 current system and ohmic losses by broad dipolarization-injection fronts. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124, 4064–4082.
<https://doi.org/10.1029/2019JA026521>

[2] Merkin, V. G., Panov, E. V., Sorathia, K., & Ukhorskiy, A. Y. (2019). Contribution of bursty bulk flows to the global dipolarization of the magnetotail during an isolated substorm. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JA026872>

АСИММЕТРИЯ ТОКОВОГО СЛОЯ ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ КАК ДРАЙВЕР МАГНИТОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ

Семенов В.С., Кубышкина М.В., Еркаев Н.В., Гордеев Е.И., Коровинский Д.Б.

СПбГУ, г. Санкт Петербург, v.s.semenov@spbu.ru

Известно, что изгиб токового слоя определяется наклоном земного диполя, а также направлением (vz -компонентой) потока солнечного ветра и Vx – компонентой межпланетного магнитного поля (ММП). Показано, что совпадение знаков Vz -компоненты ММП и произведения ($vz Vx$) является признаком приходящих от Солнца альфвеновских волн и одновременно способствует увеличению асимметрии токового слоя хвоста.

Анализ данных 11-летнего периода солнечного ветра (СВ) и ММП позволил выявить заметную диспропорцию в распределении произведения ($Vx vz$) для разных знаков Vz компоненты ММП. Эту диспропорцию можно объяснить, если допустить, что около 70% времени Vz -компонента ММП переносится на орбиту Земли альфвеновскими волнами, генерируемыми на Солнце. Это подтверждается также тем фактом, что диспропорция возрастает в годы максимума активности солнечного цикла и уменьшается в годы минимума.

Мы также показываем, что аналогичное соотношение в распределении ($Vx vz$) заметно возрастает перед началом суббури, и около 70% суббурь инициируется в условиях совпадения знаков ($Vx vz$) и Vz . Методом наложенных эпох показано, что в этих условиях средняя величина Vz ММП до начала суббури примерно на 20% ниже, чем в тех случаях, когда суббуря начиналась при разных знаках ($Vx vz$) и Vz .

Эти исследования подтверждают гипотезу Кивельсон и Хьюза (1990) о влиянии наклона токового слоя хвоста на величину порога срыва суббури.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-47-05001.

ОМЕГА СТРУКТУРЫ В ГЛОБАЛЬНОМ МГД МОДЕЛИРОВАНИИ

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

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, evgeny.i.gordeev@spbu.ru

По данным глобального магнитогидродинамического моделирования проведено исследование формирования Омега-структур в сияниях в период стационарной конвекции. Модельные Омеги образуются на полярном краю зоны диффузных сияний и имеют характеристики, схожие с полученными по данным камер всего неба и снимков со спутников в УФ диапазоне: долготный размер $\sim 5 - 8^\circ$, скорость азимутального движения 0.3-0.5 км/с, время жизни порядка нескольких десятков минут. Кроме того, каждой модельной Омега-структуре соответствует пара продольных токов с общей интенсивностью 0.5-1 МА, в соответствии с известным из наблюдений электродинамическим портретом явления. Трассирование магнитных линий из ионосферы в плазменный слой магнитосферы показало, что Омега-структуры являются ионосферным проявлением струйных течений (BBF), проникающих в моделируемом событии на расстояния глубже геостационарной орбиты. Омеги проецируются во фланги узких струй с характерной шириной $\sim 1 R_E$, по которым протекает сильный продольный ток.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом, проект № 19-77-10016.

ПРЕДВЕСТНИКИ И ДОЛГОТНЫЕ ЭФФЕКТЫ СУББУРИ: ПО ДАНЫМ MAIN КАМЕР В АПАТИТАХ И СПУТНИКАМ THEMIS

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

¹ ПГИ, г. Апатиты, Россия, despirak@gmail.com

Представлен анализ пространственно-временной динамики суббури 24 декабря 2014 г. в интервале с 16:30 до 17:30 UT согласно данным большого наблюдательного комплекса: данные магнитометров по сети IMAGE и по продольной цепочке российских авроральных станций, наблюдения полярных сияний в Апатитах и наблюдения спутников THEMIS в магнитосфере. В течение исследуемого интервала времени спутники THEMIS-E и THEMIS-D находились в полуночном секторе магнитосферы на $r \sim 8,5-10,3 R_E$, пролетая над Сибирью по направлению к Кольскому полуострову. Мы показали, что начало суббури в магнитосфере было зарегистрировано в области между спутниками THE и THD, а, согласно наземным наблюдениям, - около станции Амдерма. Несмотря на редкую сеть наблюдений в Сибири, удалось проследить интенсификации суббури от точки начала, на долготе $\sim 50^\circ E$ до региона Скандинавии на долготе $\sim 30^\circ E$. Рассчитаны скорости распространения западного изгиба в сияниях (westward traveling surge - WTS) и так называемого «аврорального рога» (дуга впереди WTS), полученные значения подтверждают значения скоростей, полученные в предыдущих работах. Появление нескольких предшественников суббури в полярных сияниях (первая небольшая локализованная дуга сияний; так называемая структура типа «бусинок» в полярных сияниях и «авроральный рог») подтверждают предположение о распространении возмущений от области начала (от региона Амдермы) к западу. Показано также, что фронты диполизации и инъекции энергичных электронов в магнитосферу сопровождаются активациями полярных сияний: уярчением дуг, брейкапом и появлением WTS над Апатитами.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ПГИ.

ДИНАМИКА АНИЗОТРОПИИ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И ЕЁ СВЯЗЬ СО ВСПЛЕСКАМИ СВИСТОВЫХ ВОЛН, НАБЛЮДАЕМЫХ СПУТНИКАМИ MMS НА ФРОНТАХ ДИПОЛИЗАЦИЙ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ.

Е. Е. Григоренко, А. Ю. Малыхин, Д. Р. Шкляр, Б. Лавро, Е. Пену, Е. В. Панов

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, elenagrigorenko2003@yandex.ru

Измерения спутниками MMS 3D функций распределения электронов по скоростям в диапазоне энергий от 10 эВ до 30 кэВ с беспрецедентно высоким временным разрешением (0.03 с) позволили впервые исследовать динамику электронной анизотропии во время кратковременных (≤ 4 с) всплесков квазипараллельных свистовых волн, наблюдаемых во время распространения в хвосте быстрых плазменных потоков с диполизационными фронтами (ДФ). Статистический анализ, выполненный с помощью метода наложения эпох, примененный к 37 ДФ, наблюдавшихся MMS в геомагнитном хвосте на расстояниях $X_{GSM} < -15 R_E$, показал, что всплески квазипараллельных узкополосных свистовых волн наблюдались за передним фронтом ДФ и имели частоты в пределах (0.1 - 0.7) f_{ce} (f_{ce} – электронная циклотронная частота). Статистически показано, что мощность магнитных флуктуаций свистовых волн возрастала при приближении к нейтральной плоскости токового слоя. Исходя из дисперсионного уравнения для квазипараллельных свистовых волн, была оценена энергия резонансных электронов, которая для большинства событий находилась в диапазоне от нескольких кэВ до ~ 100 кэВ.

Исследование анизотропии электронных функций распределения показало, что во время наблюдения свистовых волн имела место перпендикулярная анизотропия $T_{per}/T_{par} > 1.0$, что свидетельствует о том, что генерация волн могла быть связана с развитием анизотропной циклотронной неустойчивости. Перпендикулярная анизотропия, наблюдаемая во время генерации свистовых волн, была обусловлена увеличением потока электронов с питч-углами вблизи 90° в диапазоне энергий более нескольких кэВ. Зависимость величины отношения перпендикулярного и параллельного потоков от энергии электронов может быть вызвана взаимодействием волн с резонансными электронами. К моменту прекращения регистрации всплеска свистовых волн наблюдалось уменьшение температурной анизотропии, что связано с рассеянием кэВ-ных электронов. Получены оценки инкрементов квазипараллельных свистовых волн, наблюдаемых на ДФ, и исследована динамика анизотропии функции распределения электронов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-47-05001 и гранта РФФИ № 19-02-00179.

ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРОННОЙ АНИЗОТРОПИИ И ИХ СВЯЗЬ С ВОЛНОВОЙ АКТИВНОСТЬЮ В ОБЛАСТИ ТОРМОЖЕНИЯ БЫСТРЫХ ПОТОКОВ В БЛИЖНЕМ ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ. НАБЛЮДЕНИЯ MMS.

А. Ю. Малыхин, Е. Е. Григоренко, Д. Р. Шкляр, Е. В. Панов

Используя данные эксперимента Fast Plasma Investigation (FPI) на борту Magnetospheric Multiscale Mission (MMS), полученные с беспрецедентно высоким временным разрешением (0,03 с), выполнен анализ 3D функций распределения электронов в диапазоне энергий от 10 эВ до 30 кэВ во время продолжительных диполизаций в ближнем геомагнитном хвосте ($-17R_E \leq X_{GSM} \leq -8R_E$). В предыдущих космических экспериментах измерения с таким временным разрешением были недоступны. Таким образом, наблюдения MMS дают возможность исследовать динамику анизотропии функций распределения электронов на временных масштабах порядка нескольких секунд, характерных для всплесков свистовых мод, которые часто наблюдаются во время диполизаций. Для данного исследования было выделено 48 продолжительных диполизаций (длительностью более 5 мин), зарегистрированных с мая по сентябрь 2017 г., когда MMS находился в ближнем геомагнитном хвосте.

Используя наблюдения эксперимента FIELDS, были идентифицированы интервалы времени, в которых наблюдаются квазипараллельные свистовые моды в диапазоне частот от 0.01 до ~ 1 f/fce (fce – электронная циклотронная частота). Методом наложения эпох показано, что существует 2 группы свистовых мод, первая из которых наблюдается непосредственно после фазы быстрого роста Vz компоненты магнитного поля (~ 80 с после начала диполизации), а вторая группа наблюдается на фазе релаксации Vz компоненты (спустя ~ 6 мин. после начала диполизации). Статистически показано, что мощность магнитных флуктуаций свистовых мод возрастает при приближении к нейтральной плоскости токового слоя. Исходя из дисперсионного уравнения для квазипараллельных свистовых волн, была оценена энергия резонансных электронов, которая для большинства событий находится в диапазоне от ~ 10 кэВ до ~ 160 кэВ.

Исследование функций распределения электронов во время наблюдения квазипараллельных свистовых мод показало что:

- 1) анизотропия температур электронов, $T_{per}/T_{par} \neq 1$, наблюдается в ограниченной части энергетического спектра, что нельзя объяснить только адиабатическими механизмами (бетатронным или Ферми механизмами) и нужно дополнительно рассматривать возможность резонансного взаимодействия электронов с волнами.
- 2) во время наблюдения квазипараллельных свистовых мод, для которых резонансная энергия электронов находится в энергетическом диапазоне измерений FPI, имело место возрастание перпендикулярной анизотропии ($T_{per}/T_{par} > 1$), что свидетельствует о том, что генерация волн может быть связана с анизотропной неустойчивостью. Для таких событий получены оценки инкрементов свистовых волн и исследована динамика анизотропии функции распределения электронов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-47-05001 и гранта РФФИ № 19-02-00179.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИ-МАГНИТОСФЕРНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ

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

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, ildars@ngs.ru

В лабораторном эксперименте с применением лазерной плазмы исследуется взаимодействие взаимопроникающих плазменных потоков в дипольном магнитном поле. Целью таких опытов является лабораторное моделирование процессов, которые могут протекать в магнитосфере горячих экзопланет [1-2]. Отличие таких магнитосфер состоит в наличии плотной плазмы, истекающей из верхней атмосферы планеты. В экспериментах магнитосфера вокруг магнитного диполя формируется квазистационарным потоком плазмы тета-пинча. Далее два луча лазерного излучения фокусируются на поверхность двух мишеней, симметрично расположенных на корпусе диполя и создают поток лазерной плазмы, расширяющейся наружу от диполя и навстречу плазме тета-пинча. Предыдущие эксперименты показали, что лазерная плазма захватывает магнитное поле диполя и уносит далеко за пределы первоначальной магнитосферы [3-5]. В настоящей работе описан эксперимент, который имел цель исследовать, как лазерная плазма захватывает дипольное магнитное поле вместе с замагниченной фоновой плазмой непосредственно в области внутренней магнитосферы. Все предыдущие эксперименты с лазерной плазмой показывают, что она на стадии разлета эффективно вытесняет магнитные поля из своего объема. Поэтому интерес представляет выявить физический процесс, благодаря которому лазерная плазма вмораживает магнитное поле. Измерения показали, что поток фоновой плазмы формирует вокруг диполя магнитосферу масштабом 20 см. Пролет лазерной плазмы через эту магнитосферу показывает необычные магнитные возмущения. На фронте лазерной плазмы наблюдается вытеснение главной компоненты магнитного поля, как это ожидается в случае простого МГД взаимодействия. Однако, с приходом основного потока лазерной плазмы знак возмущения магнитного поля меняется и соответствует усилению поля. Таким образом, это можно интерпретировать как захват лазерной плазмой дипольного поля. С увеличением расстояния от диполя начинает наблюдаться только фаза усиления поля, без его вытеснения. Другой обнаруженной особенностью является генерация значительной некомпланарной компоненты магнитного поля (компоненты, перпендикулярной исходному дипольному полю, а также направлению потока плазмы). Из наших предыдущих исследований известно, что это является проявлением Холловских или двух-жидкостных эффектов [3].

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 18-12-00080, проектов РФФИ 18-29-21018 и 19-02-00993, а также в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117021750017-0)

1. Antonov V. M., et al. // The Astrophysical Journal 2013. V. 769. P. 28
2. Khodachenko M. L., et al. // The Astrophysical Journal 2015. V. 813. P. 50
3. Shaikhislamov I. F., et al. // Adv. Space Res. 2013. V. 52. P. 422
4. Shaikhislamov I. F. et al. // Plasma Physics Reports. 2015. V. 41. PP. 399-407.
5. Shaikhislamov I. F. et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2016. V. 58. P. 115002.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ИОНОВ НАД ЛУННЫМИ МАГНИТНЫМИ АНОМАЛИЯМИ

**Руменских М. С., Ефимов М. А., Березуцкий А. Г., Чибранов А. А., Бояринцев Э. Л.,
Посух В. Г., Шайхисламов И. Ф.**

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, marina_rumenskikh@mail.ru

Процессы, происходящие в космической среде, являются комплексными и сложными для интерпретации. Космическая среда образована в основном плазмой, и исследование взаимодействия плазменных потоков является важной задачей при изучении космического пространства.

Как известно, Луна, в отличие от Земли, не имеет глобального магнитного поля. Однако в определенных местах на Луне потоки заряженных частиц Солнечного ветра отражаются более эффективно и качественно иным образом, чем в остальных. Данное явление объясняется существованием локальных намагниченностей и носит название Лунных Магнитных Аномалий (ЛМА). При натекании Солнечного ветра на такие участки образуется мини-магнитосфера, которая препятствует проникновению заряженных частиц и изменяет локальное альбедо Лунной коры.

Известно, что ЛМА располагаются в основном над местами с неравномерной структурой поверхности (кратеры и океаны). При этом структуру ЛМА сложная и обычно состоит из нескольких локальных дипольных источников. Изучение плазменных процессов над ЛМА ограничивается пролетами спутниками на высотах 50-100 км, и детальное изучение лунных мини-магнитосфер требует новых подходов. На стенде «Космические исследования-1» Лаборатории 3.1 Института лазерной физики СО РАН было проведено лабораторное исследование магнитосферы, образованной при обтекании магнитного квадрупольного или дипольного водородной плазмой. В ходе эксперимента были измерены потоки отраженных на границе мини-магнитосферы частиц.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №18-12-00080 и грантов РФФИ 19-02-00993, 18-29-21018.

БУРЕВАЯ ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРЫ И ВАРИАЦИИ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА

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

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
klg@dec1.sinp.msu.ru

Магнитосфера Земли находится под постоянным и активным воздействием межпланетной среды. Вариации солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) прямо, или опосредованно, контролируют структуру и динамику магнитосферы, развитие магнитосферных токовых систем, перенос, потери и ускорение заряженных частиц. В свою очередь, и сами потоки частиц создают электрические токи, которые вносят свой вклад в динамику магнитосферного поля. Представляет несомненный интерес совместное изучение согласованной динамики магнитосферных токов и потоков заряженных частиц разной природы в магнитосфере.

Особый интерес представляют вариации двух популяций частиц, определяющих состояние магнитосферы: ионов кольцевого тока и энергичных электронов внешнего радиационного пояса. Развитие и распад кольцевого тока происходят, как в ответ на изменение условий в межпланетной среде, так и в связи с внутримангнитосферными процессами (мангнитосферные суббури, волновая активность), также зависящими от условий в солнечном ветре и от ММП. Вариации кольцевого тока приводят к изменениям магнитного поля внутри области захвата энергичных электронов внешнего радиационного пояса, что существенным образом сказывается на динамике потоков электронов. Сопоставление одновременных данных измерений потоков частиц спутниками на низких, приэкваториальных и геостационарных орбитах для геомагнитных возмущений разной интенсивности свидетельствует о согласованной динамике кольцевого тока и внешнего радиационного пояса.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-05-00960.

КАППА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И МАГНИТОСФЕРНАЯ ДИНАМИКА

**Е.Е. Антонова^{1,2}, И.П. Кирпичев², И.Л. Овчинников¹, М.В. Степанова³, В. Г. Воробьев⁴,
О.И. Ягодкина⁴, М.О. Рязанцева², Н.В. Сотников¹, М.С. Пулинец¹, С.С. Знаткова¹, С.К.
Мить⁵, П.С. Казарян⁵**

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова,
elizaveta.antonova@gmail.com

²Институт Космических Исследований РАН

³University of Santiago de Chile

⁴Полярный Геофизический институт

⁵Физический факультет МГУ

Характерными особенностями бесстолкновительных плазменных систем являются развитие плазменной турбулентности в широком диапазоне частот и пространственных масштабов и формирование каппа распределений ионов и электронов. Такой бесстолкновительной плазменной системой является магнитосфера Земли, возникающая при обтекании геомагнитного поля турбулентным солнечным ветром, в котором потоки электронов и ионов хорошо описываются каппа распределениями. Квазиравновесные каппа распределения формируются в бесстолкновительных плазменных системах при релаксации неравновесных распределений. Релаксация неравновесных функций распределения к каппа функциям описывается в рамках неэкстенсивной статистической механики и термодинамики Тсаллиса, являющейся обобщением классической статистики Больцмана-Гиббса-Шеннона. В магнитосфере Земли неравновесные функции распределения образуются при нарушении магнитостатического равновесия и в ходе магнитосферно-ионосферных взаимодействий.

Суммированы результаты наблюдений каппа распределений в магнитосфере Земли в магнитоспокойное время и во время магнитосферных суббурь. Выделены области с минимальными значениями параметра k , характеризующего жесткость спектра на энергиях значительно превышающих тепловые. Показано, что результаты наблюдения k параметра позволяют выделить области интенсивного ускорения частиц и области релаксации, в которых происходит увеличение k параметра и при $k \rightarrow \infty$ формируются максвелловские распределения. Обсуждается использование полученных результатов при решении задач магнитосферной динамики и при использовании метода морфологического проецирования при определении проекции аврорального овала на экваториальную плоскость.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-05-00362.

СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ КАППА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПЛАЗМЕННОГО 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

Релаксация функций распределения в бесстолкновительных плазменных системах приводит к формированию каппа распределений. В то время как максвелловские функции распределения описываются двумя параметрами (концентрацией n и температурой T), каппа распределения имеют три основных параметра: n - концентрацию, E_0 - энергию теплового ядра распределения и k параметр, определяющий показатель степени при энергиях намного превышающих тепловые. Такой вид распределения часто регистрируется в различных плазменных системах, включая магнитосферу Земли. К актуальным проблемам магнитосферных исследований относится определение характерного времени релаксации к данному типу распределения. Решение данной проблемы включает определение связи между двумя параметрами k и E_0 . Результаты ранних работ на малой статистике указывали на ее линейный характер.

В работе выделены спектры ионов на геоцентрических расстояниях от 3 до 20 R_E вблизи экваториальной плоскости, позволяющие проводить аппроксимацию спектров ионов одним каппа распределением, и определены каппа-параметры этих аппроксимаций.

Набрана статистика на основании данных международной миссии THEMIS за 4 года (2007-2010 гг.). Анализ взаимосвязи параметров k и E_0 (при дифференциации плазмы по значению плазменного параметра β) показал, что эта зависимость не является линейной, а имеет степенной вид. Получены значения показателя степени при различных значениях плазменного параметра. Показано, что показатель степени практически не зависит от β и близок к 0.5.

РОЛЬ АДИАБАТИЧЕСКИХ И НЕАДИАБАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ДИНАМИКЕ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Н.В. Сотников¹, Е.Е. Антонова^{1,2}, М.О. Рязанцева², И.Л. Овчинников¹, И.А. Рубинштейн¹, В.О. Баринава¹, С.К. Мить¹

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

²Институт Космических Исследований РАН

sotnikov.nikita@hotmail.com

К нерешенным проблемам физики магнитосферы относится формирование внешнего электронного радиационного пояса. Суммируются последние результаты анализа формирования внешнего пояса, полученные с использованием отечественной программы МЕТЕОР и миссии RBSP/Van Allen Probes. Проведен анализ положения границы захвата релятивистских электронов во время ряда больших магнитных бурь. Показано, что во время всех проанализированных бурь граница захвата электронов с энергией >100 кэВ была локализована внутри аврорального овала, а в ряде пролетов совпадала с полярной границей аврорального овала. Данный результат приводит к изменениям представлений о проецировании аврорального овала на плазменный слой магнитосферы Земли и показывает, что процессы на широтах аврорального овала необходимо учитывать при решении проблемы формирования внешнего радиационного пояса. Проведен анализ изменений наклонов спектров релятивистских электронов вблизи максимума формирующегося радиационного пояса. Показано, что зарегистрированное изменение интенсивности потоков при сохранении жесткости спектра демонстрирует действие адиабатического механизма при падении потоков во время главной фазы бури и возрастание потоков во время фазы восстановления. Исследован вклад отдельных суббуревых возмущений во время фазы восстановления магнитной бури. Характерное время неадиабатического ускорения не превышало в рассмотренных событиях 6 часов.

ВОЗМОЖНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ ЗАХВАЧЕННОЙ РАДИАЦИИ У МЕРКУРИЯ

Лукашенко А.Т., Лаврухин А.С., Алексеев И.И.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, a_lu@mail.ru

В работе рассматривается вопрос возможности существования радиационных поясов у планеты, обладающей собственным магнитным полем, находящейся в потоке звёздной плазмы на примере планеты Меркурий [1]. Анализ проводится с помощью теории движения заряженных частиц Штёрмера, в которой рассматриваются не конкретные траектории отдельных частиц, а области разрешённого движения в дипольном магнитном поле. Для иллюстрации происходящих процессов приводятся траектории отдельных заряженных частиц, рассчитанные с использованием интегралов движения согласно теории Штёрмера [2]. Данный способ расчёта траекторий менее требователен к вычислительным ресурсам и позволяет рассматривать до 10^5 частиц. В работе рассматриваются критерии формирования стабильной популяции захваченных частиц. По результатам пролётов космических аппаратов у Меркурия не было обнаружено стабильных радиационных поясов и кольцевого тока. В работе даётся ответ, почему у Меркурия не наблюдаются радиационные пояса и в каком случае у планеты могут существовать стабильные потоки захваченных заряженных частиц.

Показано, что у планеты со слабым магнитным полем не существует стабильной области захвата. У планеты с более выраженным магнитным полем, у которой, однако, как у Меркурия, эта область ненамного превышает радиус планеты, высыпания захваченных заряженных частиц могут происходить как за счёт того, что точка отражения оказывается ниже поверхности изначально, так и за счёт изменения её положения из-за неадиабатичности движения частиц. Другой причиной потерь является аксиальная асимметрия магнитосферного поля, которая приводит к расщеплению и разветвлению дрейфовых оболочек и выходу частиц на границу магнитосферы. В результате, через определённое время без подпитки извне пояса опустошаются. У частицы, движущейся в поле диполя, имеются три характерные частоты: частота ларморовского вращения, изменяющаяся в процессе движения частицы, частота колебаний между точками отражения (баунс-колебаний) и частота совершения оборотов при дрейфе в азимутальном направлении. Эффект неадиабатичности движения был отмечен ранее [3] и объясняется резонансами между ларморовским вращением и баунс-колебаниями.

1. Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bobrovnikov S.Yu., Slavin J.A., and Sarantos M. // J. Geophys. Res. 2008. V. **113**. P. A12210.
2. Shebalin J.V. // Phys. Plasmas 2004. V. **11**. P. 3472.
3. Кузнецов С.Н., Юшков Б.Ю. // Физика плазмы 2002. Т. **28**. С. 375.

«ПРОНИКНОВЕНИЕ» Ву-КОМПОНЕНТЫ ММП В МАГНИТОСФЕРУ В СВЕТЕ РБФ-МОДЕЛЕЙ

Андреева В.А., Цыганенко Н.А.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, varandreeva@gmail.com

Один из эффектов межпланетного магнитного поля (ММП) – это возникновение в приэкваториальной магнитосфере дополнительной азимутальной Ву-компоненты поля, хорошо коррелирующей с ММП Ву. Мы восстановили из наблюдений трехмерное распределение индуцированного (или «проникающего») поля в ближней магнитосфере, используя многолетний набор спутниковых измерений миссий Geotail, Polar, Cluster, Themis, Van Allen Probes и гибкую математическую модель магнитного поля, основанную на радиальных базисных функциях (РБФ). В работе представлено два варианта РБФ-моделирования: первый охватывает все долготы во внутренней магнитосфере, а второй сфокусирован только на ночном секторе. Показано, что индуцированная Ву-компонента максимальна на ночной стороне в узком приэкваториальном слое на радиальных удалениях $\sim 10-12 R_E$, и что эффект сильнее на флангах слоя, в вечернем и утреннем секторах. Полученному распределению «проникающего» поля соответствует дополнительная система продольных токов, текущих по границе плазменного слоя. «Проникновение» усиливается при южной ориентации ММП и с возрастанием угла наклона геодиполя.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СКОШЕННОСТИ ПОДСОЛНЕЧНОЙ ЧАСТИ ОКОЛОПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН И СОПОСТАВЛЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ

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

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

Межпланетное магнитное поле, направленное под углом к вектору скорости солнечного ветра, приводит к отклонению носовой точки ударной волны от направления набегающего потока. Такая скошенность околопланетной ударной волны исчезает, только в случаях, когда магнитное поле солнечного ветра направлено вдоль его скорости или перпендикулярно вектору скорости. Полученное ранее точное аналитическое решение для угла наклона ударной волны к направлению потока плазмы на больших расстояниях от планеты (конуса Маха) было модифицировано для учета дополнительной скошенности ударной волны, по сравнению с обычной абберацией из-за орбитального движения Земли. Это позволяет строить аналитическую модель ударной волны для произвольного направления межпланетного магнитного поля, используя скошенность как дополнительный параметр модели. Приводятся результаты такого моделирования, основанные на подробных 3-х мерных МГД расчетах.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ИКИ РАН при частичной поддержке Программы № 28 ПРАН.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУНКЦИЙ СВЯЗИ (COUPLING FUNCTIONS) ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ СОСТОЯНИЯ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Мягкова И.Н., Широкий В.Р., Владимиров Р.Д., Баринов О.Г., Доленко С.А.,
Калегаев В.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, dolenko@srd.sinp.msu.ru

Целью данного исследования является анализ работы моделей, прогнозирующих состояния магнитосферы Земли при помощи искусственных нейронных сетей, с использованием функций связи. Как известно, для оценки энергии, передаваемой от солнечного ветра в магнитосферу Земли, используются функции связи (coupling functions), описывающие поглощение и рассеивание энергии магнитосферой [1]. К таким функциям можно отнести такие величины, характеризующие энергетическое состояние магнитосферы, как динамическое давление солнечного ветра, поток вектора Пойнтинга через магнитопаузу, электрическое поле солнечного ветра, характеризующее крупномасштабную магнитосферную конвекцию, и другие.

Помимо функций связи, во входной массив данных, представляющий собой многомерный временной ряд, входят параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля, геомагнитные индексы, а также потоки релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли. Прогнозируемым значением при этом является один из геомагнитных индексов или значение потока релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли в интересующий момент времени в будущем.

В работе обсуждаются преимущества использования различных функций связи при прогнозировании состояния магнитосферы Земли.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик НИИЯФ МГУ 2.1 (115041410195) и 6.1 (01201255512).

1. D. Finch, I & Lockwood, Mike. (2007). Solar wind-magnetosphere coupling functions on timescales of 1 day to 1 year. *Annales Geophysicae*. 25. 10.5194/angeo-25-495-2007.

АНОМАЛИИ ОНЧ – ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОРБИТАХ СПУТНИКОВ «ИНТЕРКОСМОС» И DEMETER

Ружин Ю.Я., Ларкина В.И., Докукин В.С.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова
РАН (ИЗМИРАН), г.Троицк, E-mail: ruzhin@izmiran.ru*

В работе представлена картина развития геофизических процессов над областями подготовки землетрясений по материалам спутников ИК-18, -19. Отклик ионосферной плазмы зарегистрирован как над зоной эпицентра, так и в магнитосопряжённом полушарии. Суть явления заключалась в том, что над эпицентрами сильных землетрясений по спутниковым данным были зарегистрированы всплески магнитной и электрической компонент поля низкочастотных шумовых излучений за несколько часов до главного сейсмического удара [1]. Электромагнитное ОНЧ-излучение в верхних слоях ионосферы обнаруженное спутниковыми измерениями, представляет собой аномалию в виде пояса, вытянутого вдоль долготы на десятки тысяч километров (шириною $\sim 2-3^\circ$ по широте). По амплитуде всплески всегда превышали уровень шумов, обычно наблюдаемый в данной области пространства [2-3].

Программа проекта DEMETER для исследования космических предвестников сейсмоактивности была сформулирована на рабочих совещаниях Совета «Интеркосмос» (1990–1992). Несмотря на состав научной аппаратуры французского спутника DEMETER (2004-2010) уровня нового тысячелетия, такая аномалия - предвестник в ОНЧ-диапазоне (который вытянут вдоль магнитной оболочки центрированной на эпицентр будущего землетрясения) зарегистрирован не был.

Нами проведена оценка энергии пикселя сканирования для спектрометра DEMETER относительно полосы частот и времени интегрирования аналогового канала спутников ИК-18, -19. Так, например, для канала $f_0 = 4600$ Гц аналоговой регистрации (спутники ИК-18, -19) сигнал суммируется в полосе частот, которая соответствует 550 Гц ($\Delta f = 0,125f_0$) и в пределах времени, определяемого темпом опроса телеметрии (около 3 с). Прибор ISC на спутнике DEMETER выдаёт спектр мощности электрической и магнитной компонент в ОНЧ- и НЧ диапазонах (0–20 кГц) каждые 2,048 с и с разрешением по частоте 19,53 Гц. Из этих параметров регистрации видно, что по чувствительности данные измерений со спутников ИК-18, -19 выигрывают почти три порядка.

Отметим, что в проекте DEMETER всё-таки удалось показать наличие на орбите спутника ОНЧ-шумов в окрестности эпицентров за несколько часов до землетрясений, но за счёт накопления сигнала для 2628 землетрясений (к анализу привлечены 4385 ч данных с орбиты!) с магнитудой больше 4,8 (<https://cnes.fr/en/web/CNES-en/5185-demeter-pulling-out-all-the-stops.php>).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00962.

1. Larkina V. I., Nalivayko A. V., Gershenzon N. I., Gokhberg M. B., Lipеровsky V. A., Shalimov S. I. satellite // Geomagn. Aeron. 1983. V. 23. P. 684–687.
2. Ruzhin Yu. Ya., Larkina V. I., Depueva A. Kh. // Adv. Space Res. 1998. V. 21. No. 3. P. 525–528.
3. Ruzhin Yu. Ya., Depueva A. Kh. // J. Atmosph. Electricity. 1996. V. 16. No. 3. P. 271—288.

НОВЫЕ РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ИНДЕКСЫ ДЛЯ РОССИЙСКОГО СЕКТОРА

Воробьев А.В.^{1,3}, Пилипенко В.А.^{2,3}, Козырева О.В.³, Евдокимова М.А.²

1 УГАТУ, г. Уфа geomagnet@list.ru

2 Институт Космических Исследований, г. Москва

3 Геофизический Центр РАН, г. Москва

Геоэффективность космической погоды, как правило, характеризуется геомагнитными индексами. Однако существующие планетарные индексы рассчитываются по выбранной сети станций, которые распределены по поверхности Земли крайне неравномерно. В связи с чем эти индексы не всегда адекватно характеризуют геомагнитную обстановку на территории России. Кроме того, для описания вариабельности геомагнитного поля, существенной для воздействия космической погоды на наземные технологические системы, необходимо введение новых индексов, основанных на производной геомагнитного поля dB/dt , т.к. стандартные геомагнитные индексы (AE, PC), характеризующие суббуревую активность, недостаточны для предсказания величины ГИТ. Предлагается ввести в исследования по космической погоде новые региональные геомагнитные индексы, характеризующие среднечасовые значения возмущения геомагнитного поля и его вариабельности в российском секторе на авроральных широтах. Индексы рассчитываются по данным российских магнитных станций на геомагнитных широтах 50 – 80 градусов. Сравнение региональных индексов со стандартными планетарными индексами во время сильнейших магнитных бурь 2015 г. показало, что использование исключительно планетарных индексов для оценки региональных возмущений космической погоды может привести к ложным выводам.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 16-17-00121.

ИЗУЧЕНИЕ ВАРИАЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ НА НАЗЕМНЫХ УСТАНОВКАХ ГОРОДА НУР-СУЛТАН, КАЗАХСТАН

Тулеков Е.А.¹, Морзабаев А.К.¹, Махмутов В.С.², Филиппов М.В.²

¹Евразийский национальный университет им.Л.Н. Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан,
yerzhan_ta@mail.ru

²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия

Космические лучи играют существенную роль в атмосферных процессах, связанных с погодой и климатом. Именно в атмосфере происходят явления и процессы, интерес исследователей к которым на протяжении многих десятилетий не ослабевает - все вопросы об окружающей среде всегда были актуальными и важными. Понимание протекающих процессов является основой для разработки методов контроля антропогенного воздействия на атмосферу в целом. С другой стороны, физическая природа вариаций потоков вторичных космических лучей, в том числе вызванных атмосферными процессами, недостаточно изучена и создание, внедрение экспериментальных комплексов является необходимым для проведения таких исследований.

С этой целью в 2015-2018 гг. на физико-техническом факультете Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан, Республика Казахстан), в содружестве с сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, был создан космофизический комплекс, состоящий из детектора CARPET, нейтронного детектора и электростатического флюксметра EFM-100. В работе представлены основные характеристики созданного комплекса и экспериментальные данные, полученные в течение 3-х лет. Приведены отдельные результаты проведенного анализа зарегистрированных вариаций потоков космических лучей и условий в земной магнитосфере и в межпланетной среде.

Статистическое исследование по отклику электронного радиационного пояса на геомагнитные возмущения в условиях низкой солнечной активности 2015-2019 гг.

Шустова А.Н.

НИИЯФ им. Скобелева МГУ, г. Москва, Россия, shustova.an14@physics.msu.ru

Целью данной работы является детальное рассмотрение ряда магнитосферных событий в период с 2015 по 2019 гг. (на минимуме солнечной активности). Особый интерес представляет сравнение геомагнитных бурь с принципиально различными тенденциями в динамике внешнего радиационного пояса: с наблюдаемой интенсивной инжекцией или существенными потерями частиц на фазе восстановления бури, или же с сохранением добурового уровня потоков.

В первой части работы была проведено статистическое исследование по выявленным за указанный период геомагнитным событиям с индексом DST ниже -50 нТл (всего 63 бури).

Во-первых, выяснялись основные тенденции отклика электронного радиационного пояса. Если поток электронов с энергиями выше 2 МэВ (данные GOES) по окончании фазы восстановления отличается от предбурового потока более чем на $1000 \text{ c}^{-1} \text{ ст}^{-1} \text{ см}^{-2}$, считалось, что поток увеличился (примерно 70% случаев) или уменьшился (20%), если же разница оказывалась меньше – не изменился (10%). Во-вторых, анализировалась влияние на изменение потока условий развития бури, а именно направления ММП и скорости солнечного ветра на фазе восстановления. Результаты показали, что направление B_z -компоненты ММП являются более сильным фактором – при преимущественно отрицательной B_z (южном ММП) бурь с последующим повышением потока оказалось подавляющее большинство, а при положительной – почти половина всех бурь проходят без изменения потока. Хотя доля бурь с понижением потока существенно меняется (максимальна при положительной B_z), их было слишком мало для уверенной статистики. Солнечный ветер является более слабым критерием – хотя и наблюдается тенденция увеличения доли бурь с растущим постбуревым потоком с увеличением скорости солнечного ветра, общее соотношение бурь с различным итогом меняется незначительно. Довольно сильным критерием оказался параметр $-[B_z * V_{sw}]$. Для пяти бурь с различной тенденцией был рассчитан его коэффициент корреляции с потоком электронов на фазе восстановления – для всех бурь кроме одной он достигал значения -0.7. Кроме того для этих четырех бурь наблюдалось сходная тенденция его изменения: уход в отрицательные значения на главной фазе бури, возвращение к нулю и снова сильный скачок к -1. Причина отличия пятой бури, возможно, кроется в короткой фазе восстановления – сразу за ней наблюдалась другая буря.

В настоящее время общепринятой точки зрения на источники динамики внешнего электронного радиационного пояса не существует, направление работы является актуальным.

УСИЛЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ОСНОВАНИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ЛИНИЙ НОВЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПОСЛЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Хачикян Г. Я.

Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан, galina.khachikyan@gmail.com

На предыдущих конференциях «Физика плазмы в солнечной системе» были представлены среднестатистические результаты, указывающие на соответствие между заселенностью геомагнитных линий в радиационном поясе и сейсмической активностью в основании этих линий на земной поверхности [1, 2]. В данном сообщении будет показано, что образование новых (дополнительных) радиационных поясов после геомагнитных бурь, сопровождается спустя несколько месяцев усилением сейсмической активности в основании геомагнитных линий этих поясов. Даты и параметры новых радиационных поясов, образовавшихся после геомагнитных бурь, взяты из работ [3-7], основанных на данных спутников CRESS, SAMPEX, SERVIS-1, Van Allen Probes. Данные о землетрясениях с магнитудой $M \geq 4.5$ получены с сайта USGS <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>. Номера геомагнитных линий (L), пронизывающих эпицентры землетрясений, рассчитаны по программе Н.А. Цыганенко [8]. Результаты исследований показали:

- в основании геомагнитных линий нового радиационного пояса, сформировавшегося вокруг $L \sim 2.6$ после геомагнитной бури 24.03.1991 [3], сейсмическая активность увеличилась спустя ~ 2 мес., а самым сильным было землетрясение с магнитудой $M=7.0$ на Аляске 30 мая 1991г. в основании $L=2.69$;

- в основании геомагнитных линий нового радиационного пояса, сформировавшегося вокруг $3.0 \leq L \leq 3.5$ после геомагнитной бури 03.09.2012 [3], сейсмическая активность увеличилась также спустя ~ 2 мес., а самым сильным было землетрясение с магнитудой $M=7.8$ у побережья Канады 28.10.2012г. в основании $L=3.32$;

- в основании геомагнитных линий нового радиационного пояса, сформировавшегося вокруг $L=1.5-1.8$ после геомагнитной бури 23.06.2015 [6], сейсмическая активность достигла максимума спустя ~ 2.5 мес. (сентябрь 2015г.), при этом, обращает на себя внимание тот факт, что именно в это время произошло сильнейшее $M=8.3$ землетрясение в Чили 16.09.2015 в основании более низкой геомагнитной оболочки $L=1.12$ (событие, которое на планете случается в среднем только один раз в год);

- сильнейшее за последние 55 лет землетрясение с магнитудой $M=9.1$, произошедшее вблизи о. Суматра 26.12.2004 в основании $L \sim 1.0$ и унесшее более 250 тысяч жизней, также было приурочено ко времени длительного (более года) существования пояса релятивистских электронов на $L \sim 1.5$ и менее, который возник после сильнейшей геомагнитной бури 30.10.2003 и затем пополнился после сильной геомагнитной бури 08.10.2004 [4].

В целом результаты показывают, что процесс опустошения внешнего электронного радиационного пояса сильными геомагнитными бурями с последующим формированием новых колец релятивистских электронов во внутренней магнитосфере, затрагивает одновременно и процессы в твердых оболочках Земли.

1. Хачикян Г.Я. http://plasma2017.cosmos.ru/files-2017/Plasma2017_Abstracts.pdf С. 152.
2. Хачикян Г.Я. https://plasma2019.cosmos.ru/docs/plasma2019-abstract-book_1102.pdf С. 172.
3. Blake J.B., et al. // Geophys. Res. Lett. 1992. V.19. P. 821– 824.
4. Baker D. N., et al. // Geophys. Res. Lett. 2007. V.34. <https://doi.org/10.1029/2007GL031007>
5. Baker D. N., et al. // [Space Sci. Rev.](https://doi.org/10.1007/s11214-017-0452-7) 2018. 60 p. DOI 10.1007/s11214-017-0452-7.
6. Claudepierre S.G., et al. // J. Geophys. Res. 2017. V. 122. doi:10.1002/2016JA023719.
7. Thorne R. M., et al. // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. P. 3507–3511. doi:10.1002/grl.50627.
8. Tsyganenko N.A. Geopack: 2008. <http://geo.phys.spbu.ru/~tsyganenko/Geopack2008>.

LONG-TERM DROPOUT OF RELATIVISTIC ELECTRONS IN THE OUTER RADIATION BELT DURING TWO CONTINUAL GEOMAGNETIC STORMS

Han Wu^{1,2}, Tao Chen¹, V. V. Kalegaev², M. I. Panasyuk², N. A. Vlasova², Suping Duan¹, Zhaohai He¹, Jing Luo¹, Chunqin Wang¹

1.State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2.Skobel'syn Research Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia;

Email address: hwu@spaceweather.ac.cn

Using data from various instruments on the GOES, POES, Van Allen Probes (RBSP), Meteor-M2, Fengyun series spacecrafts, we study a long-term dropout of MeV electrons during two continual geomagnetic storms of similar magnitude (Dst minimum: -48 and -53 nT) under weak solar wind conditions. The dropout occurred in the area that ring current protons were significantly enhanced observed by RBSP, and this dropout firstly occurred at higher L-shells and then gradually propagated inward observed by low-altitude satellites on 31 January 2016. Moreover, the relativistic electron fluxes at $L > 5$ were almost completely lost from the radiation belt and dropped below background levels, while the fluxes in lower L-shells ($4 < L < 5$) partly lost observed by RBSP and low-altitude satellites. Then, on 5 February, only fluxes at $L > 5$ seemed to recover to pre-storm levels observed by all satellites used in this paper, but fluxes at $4 < L < 5$ hardly to recover to pre-storm levels. These observations indicated that both the loss and enhancement mechanisms firstly happened at higher L-shells. By analyzing PSD, it is shown that the contribution of precipitation into the atmosphere by local wave-particle interactions is fairly weak during two continual storms with low speed solar wind, while radial diffusion is the main reason for the dropout of relativistic electrons at higher L-shells. As for the enhancement of relativistic electrons, firstly ULF waves increased the fluxes by radial drift motion, then chorus waves accelerated local electrons into higher energy. Stronger radial diffusion at higher L-shells as well as observed chorus waves at $L > 5$ all explain why only the relativistic electrons at $L > 5$ region could recover to pre-storm level after the long-term dropout.

ВАРИАЦИИ ИНДЕКСА $ASY-H$ В ПЕРИОДЫ МАГНИТНЫХ БУРЬ ОТ РАЗНЫХ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Л.А. Дремухина¹, Ю.И. Ермолаев², И.Г. Лодкина²

¹ИЗМИРАН, г. Москва, (Троицк), dremukh@izmiran.ru

²ИКИ РАН, г. Москва

В работе продолжены исследования различий в отклике магнитосферы на приход к магнитопаузе возмущенного солнечного ветра различных типов, начатые в статьях [1, 2]. Мы провели анализ динамики индекса $ASY-H$ в интервалы магнитных бурь, вызванных разными межпланетными источниками. 5-минутный индекс $ASY-H$ определяется по измерениям 6-ти низко- и среднеширотных долготно распределенных магнитных обсерваторий, как максимальная разница между измерениями на разных долготах, и определяет степень асимметрии геомагнитного возмущения на средних широтах. Для анализа мы использовали среднечасовые значения $ASY-H$, полученные усреднением 5-минутных данных, и индекса Dst , представленные в базе данных OMNI. Были отобраны 58 интенсивных магнитных бурь с $-250 \leq Dst_{\min} \leq -100$, зарегистрированных за период 1995-2017 гг., инициированных одной из следующих крупномасштабных структур солнечного ветра: области сжатия во взаимодействующих разно-скоростных потоках CIR; межпланетные CME, включающие магнитные облака MC и «поршни» Ejecta; области сжатия Sheath перед межпланетными CME. Идентификация межпланетного источника проводилась на основе Каталога крупномасштабных структур солнечного ветра за 1976-2017 гг. (см. сайт [ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/](http://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/) и статью [3]). Источник считался однозначно определенным, если магнитная буря начиналась в его интервале и ее главная фаза заканчивалась не ранее, чем за 2 часа до окончания интервала этого источника. К выбранным четырем группам бурь был применен двойной метод наложенных эпох (ДМНЭ), отдельно для интервалов главной и восстановительной фаз бури. Опорными моментами для ДМНЭ в первом случае принимались моменты начала резкого понижения Dst и достижения $Dst_{\min}$, а во втором - момент $Dst_{\min}$ и время наступления значения Dst , равного $(1/3) Dst_{\min}$. Проведенный анализ показал, что для всех групп магнитных бурь максимальные значения индексов $SYM-H$ и Dst наступают одновременно и близки по амплитуде. Однако для магнитных бурь, инициированных областями Sheath, значения индекса $ASY-H$, в среднем, на 40% выше, чем для бурь трех остальных групп. Дополнительный анализ, выполненный для потока протонов с энергиями >10 МэВ, наблюдаемых на геостационарных КА GOES в исследуемые интервалы бурь, показал, что при Sheath-бурях этот поток возрастает на два порядка по сравнению с бурями остальных групп.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00177а.

1. Николаева Н. С., Ермолаев Ю. И., Лодкина И. Г. Зависит ли генерация магнитной бури от типа солнечного ветра? Геомагнетизм и Аэрономия, т. 57, № 5, стр. 555–561, 2017.
2. Дремухина Л. А., Ермолаев Ю. И., Лодкина И. Г., Динамика межпланетных параметров и геомагнитных индексов в периоды магнитных бурь инициированных разными типами солнечного ветра, Геомагнетизм и Аэрономия, т. 59, № 6, стр. 683-695, 2019.
3. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976-2000 гг., Космические исследования, т. 47, № 2, стр. 99-113, 2009.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ДИПОЛЬНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В ЛАБОРАТОРНОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Ефимов М.А.^{1,2}, Чибранов А.А.^{1,2}, Березуцкий А.Г.¹, Шайхисламов И.Ф.¹, Посух В.Г.¹, Захаров Ю.П.¹, Бояринцев Э.Л.¹, Руменских М.С.¹, Мирошниченко И.Б.^{1,2}

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

НГТУ, г. Новосибирск, Россия.

В лабораторном эксперименте с целью исследования процессов, которые могут протекать в магнитосфере горячих экзопланет, моделируется взаимодействие лазерной плазмы с фоновыми плазменными потоками в магнитном поле диполя [1-2]. В опытах магнитосфера вокруг магнитного диполя сформирована потоком плазмы тета-пинчём. Лазерное излучение фокусируется на пару мишеней расположенных на корпусе тета-пинча. Так как генерируемая лазерная плазма достаточно энергична, то она прорывается через дипольное магнитное поле и пролетает через фоновую плазму на большие расстояния, при этом увлекая за собой магнитное поле диполя, унося его далеко за пределы магнитосферы. В данной работе, в отличие от предыдущих экспериментов [3-4] основное внимание уделялось физическим процессам, благодаря которым лазерная плазма увлекает за собой магнитное поле. Анализ магнитных сигналов получаемых с зондов устанавливаемых на расстояниях 5-25 см от центра диполя, показал что поток фоновой плазмы формирует вокруг диполя магнитосферу масштабом ~20 см. Пролет лазерной плазмы через эту магнитосферу показывает необычные магнитные возмущения. Также было проверено что электрические и магнитные зонды, установленные на расстоянии 60 см от диполя, показывают тот же эффект приноса потоком лазерной плазмы замороженного дипольного поля как и в предыдущих экспериментах [3-4]. Одной из обнаруженных особенностей является значительная генерация компоненты, перпендикулярной исходному дипольному полю, а также направлению потока плазмы. Предварительный вывод проведённого эксперимента состоит о том, что это вероятно связано с проявлением Холловских или двух-жидкостных эффектов, на масштабе ионно-плазменной длины, когда электроны и ионы могут двигаться по существенно разным линиям тока.

Работа выполнена при поддержке проекта РНФ 18-12-00080, проектов РФФИ 18-29-21018, 19-02-00993, 18-32-00029 и 18-42-54301, а также в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117021750017-0).

1. Antonov V. M., et al. // The Astrophysical Journal 2013. V. 769. P. 28
2. Khodachenko M. L., et al. // The Astrophysical Journal 2015. V. 813. P. 50
3. Shaikhislamov I. F. et al. // Plasma Physics Reports. 2015. V. 41. PP. 399-407.
4. Shaikhislamov I. F. et al. // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2016. V. 58. P. 115002.

ДИНАМИКА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВАРИАЦИЙ КР ИНДЕКСА ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ И ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН ДЛЯ 8 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ (1932-2018 Г.).

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

ИКИ РАН, morozova.evgeniya2014@yandex.ru

В работе вычислена динамика спектров мощности вариаций для среднесуточных величин Кр индекса геомагнитной активности и числа солнечных пятен SSN в диапазоне частот $2.5E-4$ — $2.0E-1$ 1/сут. (период 3972-5 сут.). Для 7 периодов рассчитана временная динамика (1932-2018 г.) амплитуды вариаций параметров Кр индекса (δKp) и числа солнечных пятен SSN (δSSN): периоды 2.36 г. (частота $1.2E-3$ 1/сут.), 1.72 г. ($1.6E-3$), 1.34 г. ($2.E-3$), 1.06 г. ($2.6E-3$), 0.72 г. ($3.8E-3$), 0.61 г. ($4.5E-3$) и 0.5 г. ($5.5E-3$). Следует отметить, что 20 цикл солнечной активности является некоторым переломным периодом в изменении динамики амплитуды вариаций δKp и δSSN для всех частот. Отметим основные параметры временной динамики δSSN и δKp .

Частота $1.2E-3$. Временная динамика δSSN и δKp показывает 22-годовую цикличность. Спад δSSN регистрируется в 17 и 19 солнечных циклах, возрастание в 18 и 20 циклах, после 20 цикла возрастание δSSN регистрируется в 21 и 23 циклах, спад в 22 и 24 циклах. Внутри 19, 20, 21, 22 и 23 циклов δKp возрастает на фазе роста солнечной активности и уменьшается на фазе спада.

Частота $1.6E-3$. Регистрируется очень значительная ~ 33 -годовая модуляция временной динамики δSSN , годовая модуляция ~ 20 -22 наблюдается для δSSN и δKp . Минимальные δSSN зарегистрированы вблизи максимумов 18(1947 г.), 21(1982 г.) и 24 (2014 г.) солнечных циклов.

Частота $1.9E-3$. В течение 17, 18 и 19 циклов δSSN и δKp почти не меняются. После $\sim$ в 1965 г. (20 цикл) δSSN и δKp значительно снижаются и далее показывают нерегулярную динамику. Минимальные величины δSSN и δKp показывают ~ 31 -годовую модуляцию. Минимум δKp регистрируется в 1969 г. (максимум 20 цикла) и в 2000 г. (максимум 23 цикла). Следует отметить, что локальные максимумы и резкий спад δKp между 1960 и 1992 г. и между 1974 и 2005 г. совпали с моментами значительного снижения абсолютных величин Кр индекса после их максимальных значений в 1960, 1974, 1991 и 2004 г.

Частота $2.5E-3$. Временная динамика δSSN и δKp показывает ~ 11 -летние вариации, минимальные величины δSSN регистрируются вблизи минимумов солнечных циклов. Внутри солнечных циклов регистрируется два максимума интенсивности δSSN и δKp , один вблизи максимума активности, другой через 2-3 года, в промежутке между ними интенсивность вариаций значительно снижается. Этот эффект проявляется в 18-21 циклах для δSSN и в 17, 19-23 циклах для δKp . Такие разделенные максимумы вариаций вероятно отражают эффект Гнедышева для вариаций солнечной активности. Максимальные амплитуды δKp зарегистрированы в 1962 г. и через ~ 33 г. в 1995 г. на фазе спада активности 19 и 22 циклов.

Частота $3.8E-3$. Временная динамика локальных минимумов и максимумов для δSSN показывает нерегулярные вариации с периодами ~ 15 , ~ 24 и ~ 35 лет и вариации с периодами ~ 14 , ~ 24 лет для δKp . Максимальные величины δKp зарегистрированы вблизи минимумов 20 (1975 г.), 21(1986 г.) и 22(1997 г.) циклов.

Частота $4.5E-3$. Временная динамика локальных минимумов и максимумов для δSSN показывает нерегулярные вариации с периодами ~ 12 , ~ 23 и ~ 33 лет и вариации с периодом ~ 23 лет для δKp . Минимальная амплитуда вариаций δSSN зарегистрирована в 1968 и 2002 г. (вблизи максимумов 20 и 23 циклов). Локальные минимумы δKp зарегистрированы в 1986 и 2010 г.

**ДНЕВНЫЕ ПОЛЯРНЫЕ СУББУРИ В НАЧАЛЬНУЮ ФАЗУ МАГНИТНЫХ БУРЬ:
АНАЛИЗ ОТДЕЛЬНЫХ СОБЫТИЙ В ИНТЕРВАЛЕ 7-17 МАРТА 2012 Г.**

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

ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия, gromova@izmiran.ru; ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия

Интервал 7-17 марта 2012 года, рекомендованный SCOSTEP для детальных исследований и названный CAWSES-II (The Climate and Weather of the Sun-Earth System), был первым длительным интервалом с высокой геомагнитной активностью на фазе роста 24 цикла солнечной активности. В рассматриваемый период было зафиксировано несколько магнитных бурь с внезапным началом, вызванных приходом к Земле нескольких межпланетных ударных волн. Анализ наземных магнитных наблюдений в интервале CAWSES-II показал, что высокоширотный геомагнитный эффект прихода межпланетных ударных волн к магнитосфере Земли определяется направлением межпланетного магнитного поля (ММП). Так, при южном направлении ММП скачки динамического давления солнечного ветра вызвали классические суббури в ночном секторе Земли, которые сопровождались небольшими магнитными возмущениями в дневном секторе полярных широт. Такие эффекты отмечались 7, 11 и 15 марта. Однако, приход ударной волны при северном ММП привел к развитию дневных полярных суббурь, которые наблюдались только на широтах $\geq 70^\circ$ MLat, и отсутствовали на более низких. Представлены результаты детального рассмотрения таких событий, зарегистрированных на начальных фазах магнитных бурь 8 и 12 марта. Наши исследования были основаны на анализе данных магнитометров наземной глобальной сети SuperMag и Скандинавского профиля IMAGE. Кроме того, были использованы магнитные измерения на 66 ионосферных спутников связи (проект AMPERE) для моделирования соответствующих продольных электрических токов.

ДОЛГОТНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ВО ВРЕМЯ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ БУРЬ 7-8 СЕНТЯБРЯ 2017 И 25-26 АВГУСТА 2018

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

¹ ПГИ, г. Апатиты, Россия, despirak@gmail.com

² ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

³ ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

На основе данных сетей магнитных станций IMAGE и SuperMag, базы данных OMNI, каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>) проведен анализ долготного распространения магнитных возмущений во время очень интенсивных суббурь с амплитудой больше 2000 нТл, которые обычно наблюдаются на фоне сильных магнитных бурь. Были исследованы два события сильных бурь – 7-8 сентября 2017 и 25-26 августа 2018 года. Показано, что во время двух последовательных бурь 7 и 8 сентября наблюдались две суперсуббури (supersubstorms-SSS- суббури с амплитудой больше 2500 нТл): SSS-1 была зарегистрирована во время SHEATH области сжатой плазмы солнечного ветра, SSS-2 – во время магнитного облака (MC). Были проанализированы мгновенные карты распределения ионосферных эквивалентных электрических токов, полученные по системе *MIRACLE*, и глобальные карты векторов электрического поля, построенные по наблюдениям *SuperMAG*. Показано, что обе SSS характеризовались развитием сильных возмущений в авроральных широтах (~-3600 нТл и ~ -2600 нТл), а одновременно, в полярных широтах, наблюдалось развитие дневных полярных бухт (~ 1000 нТл и ~ 400 нТл). Похожая картина глобального долготного развития электроджета, от вечерней стороны до дневной, наблюдалась и для интенсивной суббури (более 2100 нТл), которая развивалась на фоне бури 25-26 августа 2018 года. Мы предполагаем, что дневные полярные возмущения, наблюдаемые одновременно с интенсивными суббурями, могут быть результатом вытягивания тока западного направления на дневную сторону. Таким образом, показано, что во время интенсивных суббурь западный электроджет может развиваться в глобальном масштабе, от вечерней стороны до дневной.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий ПГИ, ИФЗ РАН, ИЗМИРАН.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

И.В. Дэспирак¹, А.А. Любчик¹, Н.Г. Клейменова²

¹ Полярный геофизический институт (ПГИ) г. Апатиты, Россия, despirak@gmail.com

² Институт Физики Земли (ИФЗ РАН), г. Москва, Россия

На основе данных магнитометров сетей SuperMag и IMAGE, базы данных OMNI и каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/omni/>) проведены исследования возможного прогноза появления разных типов магнитных суббурь в зависимости от наличия разных потоков солнечного ветра. Недавно было показано, что во время разных типов солнечного ветра появляются разные магнитные возмущения: «суперсуббури» (supersubstorms - SSS), которые представляют собой очень интенсивные суббури (SML или AL < -1500 нТл), «расширенные» суббури, которые начинаются в авроральных (<70°) широтах и доходят до полярных (>70°) геомагнитных широт и «полярные» суббури, которые наблюдаются только на широтах выше ~70° геомагнитной широты. Так, в начале и в конце высокоскоростного потока из корональных дыр (HSS-high speed stream), когда скорость солнечного ветра еще или уже не достигает высоких значений, будут наблюдаться «полярные» суббури. В середине потока HSS (при высокой скорости СВ) будут появляться «расширенные» суббури, они также будут наблюдаться в области сжатой плазмы перед потоком (CIR). «Расширенные» суббури будут также наблюдаться и во время корональных выбросов массы - в области сжатой плазмы перед магнитным облаком (SHEATH). Однако, во время самого магнитного облака (MC) «расширенные» и «полярные» суббури отсутствуют, но будут наблюдаться так называемые «суперсуббури» (SSS). SSS будут наблюдаться и на фронте перед магнитным облаком (или перед EJECTA) – в области SHEATH. Но для наблюдения суперсуббурь часто необходимы еще дополнительные условия - локальный скачок давления солнечного ветра, магнитуды магнитного поля и усиление отрицательной компоненты ММП. Таким образом, можно предсказать появление особых типов магнитных возмущений при наличии определенного типа солнечного ветра.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ПГИ и ИФЗ РАН.

ЗАВИСИМОСТЬ ЖЕСТКОСТЕЙ ГЕОМАГНИТНОГО ОБРЕЗАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАЗ МАГНИТНОЙ БУРИ ОТ ПАРАМЕТРОВ ГЕЛИОСФЕРЫ

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

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

Жесткость геомагнитного обрезания (ЖГО) космических лучей (КЛ), т.е. самой низкой жесткости, которой должна обладать частица, чтобы проникнуть в заданную точку в магнитосфере, определяется магнитосферным магнитным полем, которое ее тормозит. Свойства геомагнитного экрана меняются во времени в зависимости от динамического взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра (СВ) с магнитосферными полями и токами. Мы провели анализ корреляций изменений ЖГО с межпланетными параметрами и индексами геомагнитной активности во время каждой из трех фаз развития анализируемой бури — на предварительном этапе, в главной и восстановительной фазах бури. Рассчитаны корреляции вариаций ЖГО ΔR с плотностью N , скоростью V , давлением P солнечного ветра (СВ), общим ММП B и его компонентами B_z , B_y , а также Dst и Kp индексами во время разных фаз супербури 7–8.11.2004 г.

Наиболее сильная корреляция на всех этапах развития бури наблюдалась между жесткостью обрезания и Dst индексом геомагнитной активности (коэффициенты корреляции $k = 0.70 - 0.98$), а также с плотностью солнечного ветра N ($k = 0.60 - 0.80$). Во время главной фазы бури наиболее значимыми факторами были Dst и Kp индексы и все три динамических параметра солнечного ветра — плотность N , давление P и скорость V ($k = 0.50 - 0.85$). Вариации жесткости обрезания не проявляли чувствительности к B_z -компоненте ММП, так же как к азимутальной компоненте B_y и общему ММП B , ни перед началом бури, ни в ее главной фазе.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ПЛАЗМЫ С КВАДРУПОЛЬНЫМ И ДИПОЛЬНЫМ МАГНИТНЫМИ ПОЛЯМИ

Чибранов А.А.^{1,2}, Шайхисламов И.Ф.¹, Захаров Ю.П.¹, Посух В.Г.¹, Березуцкий А.Г.¹, Ефимов М.А.^{1,2}, Руменских М.А.¹, Мирошниченко И.Б.^{1,2}

¹ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, chibranov_25@mail.ru

²НГТУ, г. Новосибирск, Россия.

Магнитные поля в природе часто имеют сложную мультипольную структуру, например поле Земли в период обращения дипольного момента или поля Лунных магнитных аномалий. Поэтому, лабораторное моделирование взаимодействия таких полей с потоком плазмы представляет особый интерес для изучения.

В данном эксперименте впервые исследовались возмущения магнитного поля квадруполь и, для сравнения, диполь при их обтекании потоком водородной плазмы. Параметры потока плазмы, генерируемой тета-пинчем составляли: концентрация $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, скорость 50 – 100 км/с и длительность 30–50 мкс. Источник магнитного поля был изготовлен из двух последовательно подключенных к генератору катушек с длительностью импульса ~ 200 мкс, каждая из которых могла создавать магнитный момент величиной до $10^6 \text{ Гс} \cdot \text{см}^3$. Магнитные моменты катушек могли направляться параллельно или антипараллельно создавая диполь или квадруполь. При этом величина создаваемого магнитного поля диполем и квадруполем существенно различалась. Измерения проводились с помощью магнитных зондов и зондов Ленгмюра.

Результаты эксперимента демонстрируют, что масштаб сформировавшейся магнитосферы для диполя составлял $R_d \approx 25 \text{ см}$ с величиной вытесненного поля $dB_d \approx 55 \text{ Гс}$. В случае квадрупольного магнитного поля расстояние до магнитопаузы составило $R_q \approx 20 \text{ см}$ с величиной вытесненного поля $dB_q \approx 15 \text{ Гс}$. При этом, в квадрупольное поле поток плазмы проникает гораздо глубже, чем в дипольное поле. Полученные данные результаты являются актуальными для постановки будущих опытов по моделированию, а также для сравнения с численными расчетами.

Настоящая работа была выполнена при поддержке гранта РНФ №18-12-00080 и грантов РФФИ [19-02-00993](#), [18-29-21018](#), 18-32-00029, 18-42-543019, а также в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А17-117021750017-0).

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГЕНЕРАЦИИ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ НА ОСНОВЕ СПУТНИКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

**Чугунин Д.В.¹, Викторов М.Е.², Чернышов А.А.¹, Могилевский М.М.¹, Моисеенко И.Л.¹,
Мансфельд Д.А.², Голубев С.В.²**

¹*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, dimokch@iki.rssi.ru*

²*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Работа посвящена изучению динамики плазменно-волновой структуры в условиях циклотронного резонанса. Для решения данной проблемы используется комплексный подход, включающий анализ спутниковых данных и проведение лабораторных экспериментов по моделированию процессов в космической плазме. В данной работе изучаются свойства плазмы в источнике аврорального километрового радиоизлучения (АКР) в зависимости от высоты по спектру АКР на различных высотах. Предложен метод исследования, с помощью которого можно получить высотно-временные характеристики физических процессов, происходящих в области аврорального ускорения электронов. Поскольку генерация АКР происходит на локальной гирочастоте электронов, спектральные характеристики излучения позволяют получить высотное распределение свойств плазмы в авроральной области, а использование долговременных спутниковых измерений позволяет отследить эволюцию этих свойств во времени. Таким образом, исследования АКР являются по сути способом дистанционного зондирования по высоте магнитных силовых линий в околоземном пространстве. Это свойство использовано в работе для одновременного определения частотных характеристик авроральных процессов на разных высотах по спутниковым данным. Одновременно, для решения задачи проводилось лабораторное экспериментальное исследование генерации волн в плазме ЭЦР разряда в прямой магнитной ловушке. В условиях ЭЦР нагрева возможно создание плазмы с фракцией энергичных электронов, которые имеют анизотропную функцию распределения по скоростям. В лабораторной плазме возможным контролируемым образом воспроизвести условия, которые соответствуют условиям генерации АКР в космической плазме. Воспроизводимость экспериментов и большое количество реализаций позволяют собрать достаточное количество экспериментальных данных для изучения механизмов генерации АКР. Полученные результаты использованы для сравнения спутниковых и лабораторных данных и их интерпретации.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ НА НАНОСПУТНИКАХ ФОРМАТА CUBESAT

Богомолов А.В.¹, Богомолов В.В.^{1,2}, Дементьев Ю.Н.¹, Еремеев В.Е.¹, Жарких Р.Н.³, Июдин А.Ф.¹, Калегаев В.В.¹, Мягкова И.Н.¹, Оседло В.И.¹, Прохоров М.И.¹, Свертилов С.И.^{1,2}

1 – *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобелева, aabboogg@sinp.msu.ru*

2 – *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет*

3 – *ООО «Спутникс», Сколково, Москва*

Представлены результаты научно-образовательного эксперимента, осуществленного в России на космических аппаратах СириусСат-1,2, выполненных в формате «кубсат 1U+». Работа над созданием этих спутников была начата в июле 2017 г. в ходе проектной смены образовательного центра «Сириус» (г. Сочи) с участием школьников. Техническую поддержку проекта в части разработки полезной нагрузки, постановки научных задач, подготовки данных и обеспечения доступа к ним осуществлял НИИЯФ МГУ, в части разработки и изготовления платформы спутника и наземного комплекса – частная российская космическая компания «Спутникс». Запуск двух аппаратов СириусСат-1 и 2 был произведен космонавтами с МКС 15 августа 2018 г.

Полезной нагрузкой спутников СириусСат служит детектор, осуществляющий регистрацию заряженных частиц и гамма-квантов в диапазоне энергосвыделений 0.3 – 3 МэВ. Он выполнен на основе нескольких оптически соединенных сцинтилляторов, просматриваемых двумя фотоэлектронными умножителями. Режим измерений предусматривает как ежесекундный мониторинг, так и подробный режим, в котором происходит фиксация энергии каждой зарегистрированной частицы или кванта, а также соответствующего момента времени с микросекундной точностью. В настоящее время с каждого спутника СириусСат ежедневно поступает ~100 кб научных данных. Данные размещаются в открытом доступе на сервере космической погоды НИИЯФ МГУ.

В ходе эксперимента проводится исследование быстрых вариаций потоков электронов на внутренней границе внешнего радиационного пояса и на границе Южно-Атлантической Аномалии. Также ведется изучение динамики потоков частиц и гамма-квантов на низких орбитах в зависимости от геомагнитных условий. Дополнительные возможности дает анализ последовательного прохождения двумя близко летящими спутниками одной и той же области захваченных или высыпающихся частиц.

МЕХАНИЗМЫ ПОТЕРЬ 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, Мягкова И.Н.¹, 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

Исследовалась динамика внешнего радиационного пояса в период высокой геомагнитной активности 14 - 28 февраля 2014 г. Сильные вариации параметров межпланетной среды привели к значительным изменениям геомагнитного состояния магнитосферы и популяций захваченных частиц внешнего радиационного пояса. Последовательный анализ нескольких, последовательно развивавшихся возмущений в магнитосфере позволил дать интерпретацию вариациям внешнего радиационного пояса, связанным с потерями частиц. Использовались данные о динамике потоков электронов на геостационарной орбите со спутников GOES-15, Electro-L1, данные приэкваториальных спутников Van Allen Probes и полярного спутника Meteor-M1. Для оценки состояния межпланетной среды использовались данные аппарата ACE.

Исследована роль факторов околоземного пространства (суббуревая активность, волновая активность, вариации солнечного ветра) на динамику потоков электронов для геомагнитных возмущений разной мощности, произошедших во время рассматриваемого периода. Данные о вариациях потоков высыпающихся частиц на орбите КА Meteor-M1 и пич-угловые распределения потоков энергичных электронов, измеренные КА Van Allen Probes использовались для оценки роли адиабатических и неадиабатических механизмов в динамике внешнего радиационного пояса.

Основными механизмами эволюции внешнего электронного радиационного пояса в период 14 - 28 февраля 2014 г. являлись глобальные процессы: перемещение популяций захваченных электронов наружу и внутрь магнитосферы Земли вследствие крупномасштабных вариаций магнитоферного магнитного поля и дрейф электронов из хвоста магнитосферы под воздействием электрического и магнитного полей.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-05-00960.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ АНИЗОТРОПИИ ПИТЧ-УГЛОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОТОНОВ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Смолин С.В.

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия, smolinsv@inbox.ru

Для исследования динамики анизотропии питч-углового распределения протонов используется двумерная феноменологическая модель кольцевого тока PheMRC 2-D (two-dimensional Phenomenological Model of the Ring Current 2-D), которая рассматривает радиальную и питч-угловую диффузии с учетом потерь из-за взаимодействий волна-частица [1]. Экспериментальные данные собраны на спутнике Polar/MICS во время магнитной бури 21-22 октября 1999 г. Решая нестационарное двумерное уравнение питч-угловой и радиальной диффузии, численно определялся индекс анизотропии питч-углового распределения протонов (или показатель питч-углового распределения протонов) для питч-угла 90 градусов во время магнитной бури, когда Кр-индекс геомагнитной активности изменялся от 2 в начале бури до 7 в конце бури. Получена зависимость перпендикулярного индекса анизотропии питч-углового распределения протонов с энергией $E = 90$ кэВ в разные моменты времени от параметра Мак-Илвейна L ($2,26 < L < 6,6$). Определено на количественном уровне для магнитной бури 21-22 октября 1999 г., когда и где на ночной стороне магнитосферы Земли ($MLT = 23:00$) с увеличением Кр-индекса геомагнитной активности происходит переход от нормальных или блиноподобных питч-угловых распределений протонов к питч-угловым распределениям протонов типа «бабочка».

1. Smolin S.V. // Geomagnetism and Aeronomy, 2019, V. 59, No. 1, pp. 27-34, doi: 10.1134/S0016793218040175

ОЦЕНКА ВКЛАДА УНЧ И ОНЧ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В РОСТ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ

Белаховский В.Б.¹, Пилипенко В.А.², Шиокава К.³, Миоши Е.³

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Институт физики Земли РАН, г. Москва

³ – Институт исследования околоземного космического пространства, г. Нагоя, Япония

В работе исследован вклад УНЧ и ОНЧ волновых возмущений в ускорение электронов до релятивистских энергий (несколько МэВ) во внешнем радиационном поясе Земли. Регистрация потоков электронов осуществлялась по данным геостационарных спутников GOES, японского спутника Arase, запущенного в конце 2016 года, спутника RBSP. Для характеристики ОНЧ волновой активности в магнитосфере использованы данные спутников Arase, RBSP. Анализ показал, что наземная регистрация ОНЧ волн не может быть надежным индикатором увеличения мощности ОНЧ волн в магнитосфере вследствие их затухания в ионосфере. Использован УНЧ индекс для характеристики волновой активности магнитосферы в Pc5 диапазоне. Необходимым условием ускорения электронов до релятивистских энергий является длительная суббуревая активность, сопровождающаяся инъекцией “затравочных” электронов (50-100 кэВ). Корреляция роста потоков релятивистских электронов с высокой скоростью солнечного ветра подтверждает важную роль дрейфового резонанса магнитосферных электронов с МГД колебаниями Pc5 диапазона. Анализ показывает, что рост потоков релятивистских электронов на 1.5-2 порядка происходит через 1-3 дня после роста УНЧ индекса, а также мощности ОНЧ волн. То есть вклад данных механизмов преобладает на начальной стадии ускорения электронов. Синергетическое влияние мощности УНЧ и ОНЧ излучений на потоки релятивистских электронов выше, чем сумма отдельных вкладов этих факторов.

Потоки протонов и электронов в плазменном слое на границе внутренней магнитосферы и их зависимость от параметров солнечного ветра.

Степанов Н. А., Сергеев В. А., Сормаков Д. А., Дубягин С. В., Рунов А. В.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, nekit098@gmail.com

В спектрах протонов и электронов плазменного слоя магнитосферы можно выделить две компоненты: спектральное ядро и высокоэнергичный хвост. Магнитосферные процессы, которые формируют эти компоненты связаны с разными комбинациями параметров солнечного ветра, действуют с разными задержками и по-разному воздействуют на протоны и электроны. В данной работе мы эмпирически оцениваем степень влияния различных комбинаций параметров солнечного ветра с разными задержками на протоны и электроны с энергиями (30-300 keV), что позволяет нам выявить магнитосферные механизмы оказывающие такое влияние. Для этого мы строим модель потоков частиц разных энергий в центральном плазменном слое на входе во внутреннюю магнитосферу (на ночной стороне, 6-15 Re) по измерениям на спутниках THEMIS в период с 2007 по 2018 годы. Мы используем нормированные комбинации параметров солнечного ветра (скорость, плотность, давление, электрическое поле и т.д.) как входные параметры так, чтобы регрессионные коэффициенты при каждом параметре показывали величину их вклада в изменение потоков частиц. Входные параметры берутся с задержками до 16 часов. Из полученной модели можно увидеть, что изменения потоков протонов и электронов связаны с разными параметрами в солнечном ветре: динамическое давление важно для протонов, а скорость солнечного ветра и VBs важны для электронов. С ростом энергии растет и временная задержка, необходимая для моделирования потоков электронов.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-05-00072 «Факторы определяющие ускорение электронов в магнитосфере и динамическая модель высыпаний энергичных электронов в периоды суббурь»

ПРОЕКЦИРОВАНИЕ ОМЕГА-СТРУКТУР В МАГНИТОСФЕРУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

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

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, varandreeva@gmail.com

Омега-структуры – это компактные токовые образования, проявляющиеся в полярных сияниях как одна или несколько греческих букв Ω , быстро движущихся вдоль аврорального овала в восточном направлении. Впервые омега-структуры были описаны и выделены как отдельная разновидность сияний более 50 лет назад, и к настоящему моменту их ионосферные проявления достаточно хорошо изучены. Тем не менее, о магнитосферных процессах, приводящие к генерации такого типа сияний, известно немного, поскольку сопряженные спутниковые наблюдения существуют для единичных событий. Поэтому единственная возможность статистически изучать магнитосферные характеристики Ω – это использование различных моделей.

Цель настоящей работы – исследовать характерную конфигурацию магнитного поля в магнитосфере, приводящую к возникновению сияний такого типа. Мы использовали каталог Ω , наблюдавшихся на станциях в Фенноскандии в 1997 – 2007 [1], данные камер MIRACLE для этих событий и новую эмпирическую модель магнитного поля [2], для проецирования структур в экваториальную плоскость в магнитосфере. Это первое статистическое исследование проекции Ω , существующие работы рассматривали только отдельные события, что привело к широкому диапазону оценок расположения источника Ω в магнитосфере. Нами показано, что для 90% омега-структур их проекция находится на радиальных удалениях от 6.0 до 13.5 R_E в секторе 2-4 MLT, наиболее распространенное удаление от Земли – $R=8 R_E$ и 3 MLT. Кроме того, получены оценки минимального времени жизни структур в магнитосфере на основе оценок дрейфовых скоростей.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом, проект № 19-77-10016 «Омега-структуры в ионосфере: определение магнитосферного источника и исследование опасных геофизических последствий».

1. Partamies N., Weygand J.M., Juusola L. // Ann. Geophys., 2017. V. 35. P. 1069.
2. Tsyganenko N.A., Andreeva V.A. // J. Geophys. Res., 2016. V. 121. P. 10 786.

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ НА СПУТНИКАХ *ИНТЕРБОЛ-2* И *S3-3*

Н.Ф. Смирнова¹, Г. Станев²

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, nsmirnova@romance.iki.rssi.ru

²ИКИТ БАН, г. София, Болгария, gstanev@space.bas.bg

В этой работе сравниваются оценки плотности электронов, полученные на основе измерений зондовыми приборами, на спутниках *ИНТЕРБОЛ-2* и *S3-3* [1]. Эти спутники функционировали в похожих геофизических условиях: *S3-3* был запущен летом 1976 года в начале 21 цикла солнечной активности, а *ИНТЕРБОЛ-2* 29 августа 1996 года, через три месяца после начала 23-го цикла. *S3-3* был установлен на полярной орбите (наклонение 97.5°) с перигеем 240 км и апогеем 8040 км, а *ИНТЕРБОЛ-2* находился на орбите между перигеем 769 и апогеем 19211 км (наклонение 62.8°). Плотность и температура плазмы на спутнике *S3-3* определялась по измерениям зонда Ленгмюра, который являлся частью волнового эксперимента и снимал вольт-амперные характеристики. Параметры определялись с помощью подходящего подбора (*fitting procedure*) измеренной вольт-амперной характеристики к теоретической, при этом, если потенциал спутника $V > 0$, необходимо учитывать фотоэлектронную эмиссию. Для определения плотности фототока в работе [1] использовалась модель А. Педерсена [2]:

$$I_{pe}(V) = I_{pe0}[\exp(-V/2) + 0.0375\exp(-V/7.5)] \quad V > 0 \quad (1)$$

$$I_{pe}(V) = I_{pe0} \quad V < 0 \quad (2), \quad I_{pe0} - \text{плотность фототока насыщения.}$$

На спутнике *S3-3* зонд был покрыт аквадаг, поэтому использовалось $I_{pe0} = 18 \mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ (согласно лабораторным измерениям). По данным спутника *S3-3* типичные значения плотности электронов $\sim 10 \text{ см}^{-3}$ на высоте 8000 км.

Аппаратура *ИНТЕРБОЛ-2* позволяет определить плотность фотоэлектронного тока I_{pe0} корректно на основе сопоставления одновременных измерений потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 по методике, предложенной ранее авторами этого доклада [3], а также определить концентрацию электронов на основе этой оценки. Концентрация электронов определялась только для положительного потенциала спутника. Мы составляли уравнения баланса для спутника и зонда между токами электронов окружающей плазмы и фотоэлектронов, эмитированных освещенной поверхностью. Принималось, что фотоэмиссионные свойства зонда и спутника можно считать одинаковыми, так как разность потенциалов между плавающим потенциалом *ИНТЕРБОЛ-2* и плавающим потенциалом зонда прибора ИЭСП-2 (к зонду не применяется ток смещения) отличалась на доли вольта. В магнитосферных измерениях для приведения потенциала зонда к потенциалу окружающей плазмы в зонд направляется ток смещения, который учитывался в уравнении баланса токов для зонда. Плотность электронов определяли по формуле, применимой для положительного потенциала спутника, использовалось значение энергии электронов $kT_e = 1 \text{ эВ}$. В настоящей работе для плотности фототока используется модель (1), причем I_{pe0} определяется по методике, предложенной в [3]. В докладе приводятся примеры участков орбит *ИНТЕРБОЛ-2* с концентрацией электронов $1 - 15 \text{ см}^{-3}$, что согласуется с результатами *S3-3*.

1. Kletzing C.A., F.S. Mozer, R.B. Torbert, Electron temperature and density at high latitude // *JGR*, 1998, V. 103, no. a7, pp. 14837-14845.
2. Pedersen A., Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements // *Ann. Geophys.*, V.13, pp.118–121, 1995.
3. Smirnova N.F. and G. Stanev // *Geomagnetism and Aeronomy*, 2009, V.49, pp. 1204-1207.

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ВЫСЫПАНИЯМ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В СТРАТОСФЕРЕ И НА СПУТНИКАХ

**Дюсембекова А.С.¹, Базилевская Г.А.², Калинин М.С.², Крайнев М.Б.², Махмутов В.С.²,
Свиржевская А.К.², Свиржевский Н.С.², Стожков Ю.И.², Тулеков Е.А.¹**

¹Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан, Республика Казахстан), arikalim@mail.ru

²ФИАН, г. Москва, Россия

Высыпания высокоэнергичных электронов (ВВЭ) из внешнего радиационного пояса Земли наблюдаются группой ФИАН, начиная с 1961 г. [1]. За это время зарегистрировано более 500 событий, которые, в основном, связаны с приходом на орбиту Земли высокоскоростных потоков солнечного ветра. Изучение ВВЭ важно для понимания процессов ускорения и потерь электронов в магнитосфере и имеет важное прикладное значение, т.к. электроны ухудшают работу аппаратуры на спутниках и участвуют в ион-молекулярных реакциях в атмосфере, приводящих к истощению содержания озона. Одной из важных задач является определение количества электронов, выпадающих в атмосферу. Измерения на спутниках дают общую картину, но спутники очень быстро пролетают над каждым конкретным местом, а потоки выпадающих электронов сильно флуктуируют. Поэтому важно измерять ВВЭ, происходящие в определенном месте в течение длительного времени.

Электроны с энергиями более нескольких сотен кэВ поглощаются в атмосфере на высотах более 50 км, но они генерируют тормозное рентгеновское излучение, которое проникает в стратосферу до высот порядка 20 км и регистрируется радиозондом на баллонах. Поскольку радиозонд находится на достаточной высоте ограниченное время, по этим данным нельзя сделать заключения о продолжительности ВВЭ. Однако даже эти короткие измерения позволили уточнить динамику ВВЭ, наблюдаемых в Мурманской области ($L=5.6$), и уточнить создаваемую ими дополнительную ионизацию в атмосфере [2, 3]. Сопоставление случаев ВВЭ, наблюдаемых в стратосфере, с данными спутников дает возможность восстановить непрерывную во времени динамику ВВЭ в пункте стратосферных измерений.

В данной работе проведено сопоставление результатов стратосферных наблюдений ВВЭ с данными спутников POES 15, 16 и 17. По результатам 2003 г., когда наблюдались многочисленные случаи ВВЭ, найдено совпадение по времени ВВЭ в стратосфере и на спутниках при условии нахождения спутника в интервале широт $66-69^\circ$, долгот $10-50^\circ$, $L=5-6$ и при потоке электронов с $E > 800$ кэВ выше $1 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{ср}^{-1}$. Выполнена оценка частоты высыпаний в 2003 г. в предположении, что радиозонд непрерывно находится на высоте > 26 км.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект НННО_а № 20-55-12020.

1. Makhmutov, V.S., Bazilevskaya, G.A., Stozhkov, Yu.I., Svirzhevskaya, A.K., and Svirzhevsky, N.S.// J. Atmos. Sol.- Terr. Phys. 2016. V. 149., P. 258.
2. Mironova, I. A., Artamonov, A. A., Bazilevskaya, G.A., ... , Makhmutov, V. S., et al. GRL 2019. V. 46. P 990.
3. Mironova I.A., Bazilevskaya G.A., ..., Makhmutov V.S., et al., Science of the Total Environment 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.048>.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ В ОКРЕСТНОСТИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПЛАЗМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

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

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

Приводятся результаты измерения характеристик холодной плазмы, полученных при помощи плоского электростатического анализатора на КА Интербол-1 при пролете спутника вдоль силовых трубок геомагнитного поля в плазмосфере, вблизи плазмопаузы и в пограничном слое плазмосферы в 1995 – 2000 г.г.

Измерения показали, что при пролетах Интербола-1 вдоль участков магнитных оболочек, расположенных в глубине плазмосферы вблизи экваториальной плоскости, распределения плотности ионизированного водорода не зависят от широты, причем величина среднеквадратичного отклонения концентрации от среднего значения для каждого распределения не превышают, как правило, единиц процентов. Независимость плотности холодной плазмы от широты вблизи экваториальной плоскости можно рассматривать как экспериментальное свидетельство распределения холодной плазмы в плазмосфере в соответствии с диффузионным законом.

Было обнаружено также, что в тех случаях, когда траектория Интербола-1, оставаясь в плазмосфере, проходила в непосредственной близости от плазмопаузы, или за пределами плазмосферы, в пограничном слое, постоянство концентрации плазмы вдоль этих силовых трубок нарушалось, а трубки заполнялись неравновесной холодной плазмой, при этом величина среднеквадратичного отклонения концентрации от среднего значения достигала 0.5.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР ИКИ РАН при частичной поддержке Программы № 28 ПРАН.

ЭЛЕКТРОННЫЕ ДЫРЫ В ТОКОВОМ СЛОЕ МАГНИТНОГО ХВОСТА ЗЕМЛИ: РОЛЬ ГРАДИЕНТОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И АНИЗОТРОПИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Шустов П.И., Кузичев И.В., Васько И.Ю., Артемьев А.В., Петрукович А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, p.shustov@gmail.com

Электронные дыры представляют собой нелинейные электростатические структуры, которые часто наблюдаются вблизи областей энерговыделения в хвосте магнитосферы Земли, например, при пересоединении магнитных линий. В данной работе мы разработали 1.5D Власовский код для моделирования динамики электронных дырок при конфигурации магнитного поля, типичной для токового слоя хвоста магнитосферы. Нами рассмотрено распространение электронных дырок вдоль силовых линий магнитного поля в неоднородном магнитном поле токового слоя с анизотропной функцией распределения электронов. Нами показано, что электронные дыры, генерируемые вблизи экваториальной плоскости токового слоя, тормозятся при распространении по направлению к границам токового слоя. Этот эффект тем сильнее чем более выражен градиент магнитного поля и большее анизотропия продольных полю электронов. Полученные в моделировании данные демонстрирует, что медленные электронные дыры, наблюдаемые в пограничном слое плазменного слоя, могут быть объяснены таким эффектом торможения электронных дырок.

ОБМЕН ЭНЕРГИЕЙ МЕЖДУ ПРОТОНАМИ И ЭЛЕКТРОНАМИ ЧЕРЕЗ НИЖНЕ-ГИБРИДНЫЕ ВОЛНЫ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ.

С. Д. Ильичев¹, Д. Р. Шкляр², Т. В. Романцова²

¹Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г. Москва, sambist52@gmail.com

²Институт космических исследований РАН, г. Москва

Резонансное взаимодействие волн и частиц является одним из основных процессов, определяющих спектры волн, а также динамику энергичных электронов и протонов в магнитосфере Земли, в частности, в ее радиационных поясах. Целый ряд естественных электромагнитных излучений, наблюдаемых в магнитосфере, таких как хоровые излучения, экваториальный шум в диапазоне ниже частоты нижнего гибридного резонанса, квазипериодические излучения и многие другие генерируются, согласно современным представлениям, в результате развития кинетических резонансных неустойчивостей, то есть являются результатом резонансного взаимодействия волн и частиц [1]. Помимо обмена энергией между волнами и частицами, в процессе резонансного взаимодействия волн и частиц происходит еще один важный процесс - перенос энергии от одной группы частиц к другой, на что было указано, например, в работе [2]. Ясно, что обмен энергией между различными группами частиц представляет интерес с точки зрения появления частиц высоких энергий только в случае, если перенос энергии происходит от менее энергичных частиц к более энергичным. Такие процессы для равновесной среды запрещены законами термодинамики, но возможны в неравновесной среде, которой является неустойчивая магнитосферная плазма при наличии геомагнитных возмущений. Взаимодействие между различными группами частиц посредством электромагнитной волны может приводить не только к росту энергии одной группы частиц, но также к их питч-угловому рассеянию.

В настоящем докладе мы рассматриваем перенос энергии от энергичных протонов к релятивистским электронам посредством их резонансного взаимодействия с квази-электростатической нижнегибридной волной. Из условий резонансного взаимодействия частицы с волной

$$k_{\parallel}v_{\parallel} - \omega + n\Omega_c/\gamma = 0$$

($k_{\parallel}$, $v_{\parallel}$ - продольный волновой вектор и продольная скорость частицы, соответственно, ω и Ω_c - частота волны и циклотронная частота, γ - релятивистский фактор, n - целое число) следует, что при малых $k_{\parallel}$ и $\omega \gg \Omega_c$ эти условия могут выполняться для протонов при $n \sim \omega/\Omega_c$, а для релятивистских электронов при $n = 0$. При этом, если функция распределения протонов неустойчива, как это часто имеет место в области внешнего радиационного пояса Земли, а функция распределения электронов устойчива относительно черенковского резонанса, то возможен эффективный перенос энергии от протонов к энергичным электронам. Этот процесс детально обсуждается в докладе.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-02-00179.

Литература

1. Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М.Дж. Свистовые и альфвеновские циклотронные мазеры в космосе. М.: Физматлит, 344 с. 2011.
2. Gendrin, R. (1983), Wave particle interactions as an energy transfer mechanism between different particle species, Space Sci. Rev., 34, 271 – 287.

СТОХАСТИЧЕСКИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ НЕЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОЛНА-ЧАСТИЦА

Лукин А.С.^{1,2}, Артемьев А.В.^{3,1}, Петрукович А.А.¹

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, as.lukin.phys@gmail.com

²Национальный исследовательский институт Высшая школа экономики, Факультет физики, г. Москва, Россия

³Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США

Резонансное взаимодействие волн, распространяющихся в магнитоактивной плазме, и заряженных частиц определяет динамику плазменных популяций в различных космических плазменных системах, таких как ударные волны, радиационные пояса, области плазменных инъекций. Для систем с малыми амплитудами и широкими спектрами волновой активности такое взаимодействие описывается в рамках приближения квази-линейной теории, в основе которой лежит диффузионное уравнение Фоккера-Планка. Однако в системах с интенсивными волнами данное приближение неприменимо, и существенную роль в ускорении и рассеянии заряженных частиц в таких системах играют нелинейные резонансы. В данной работе рассматривается подход к обобщению уравнения Фоккера-Планка за счёт включения в него эффектов такого нелинейного резонансного взаимодействия. Данный подход основан на методах теории стохастических дифференциальных уравнений. Основные детали подхода рассматриваются на примере модельной задачи взаимодействия электростатической высокоамплитудной волны и заряженных частиц в неоднородном магнитном поле.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ МАКСВЕЛЛА ДЛЯ ПЛАЗМЫ В ПРИБЛИЖЕНИИ КВАЗИНЕЙТРАЛЬНОСТИ

**О.В. Мингалев¹, И.В. Мингалев¹, Х.В. Малова^{2,3}, А.М. Мерзлый³, В.С. Мингалев¹,
О.В. Хабарова⁴**

¹ Полярный геофизический институт, Апатиты, mingalev_o@pgia.ru

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

³ Институт космических исследований РАН, Москва

⁴ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

Получена модификация системы уравнений Максвелла для плазмы в приближении квазинейтральности, которая описывает электромагнитное поле в крупномасштабных безызлучательных процессах в космической плазме ионосферы, магнитосферы и солнечного ветра, а также схема ее замыкания системой уравнений переноса плазмы. В полученной системе уравнений происходит следующая трансформация исходной системы:

1) уравнение Гаусса $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$ сохраняется;

2) уравнение Пуассона заменяется условием квазинейтральности и условием продольного силового равновесия электронов:

$$\operatorname{div} \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \frac{\rho(\mathbf{x}, t)}{\varepsilon_0} \Rightarrow \left\{ e n_e(\mathbf{x}, t) = \rho_i(\mathbf{x}, t) = \sum_{\alpha=1}^K q_{\alpha} n_{\alpha}(\mathbf{x}, t), \quad -e n_e(\mathbf{B} \cdot \mathbf{E}) = (\mathbf{B} \cdot \operatorname{div} \hat{\mathbf{P}}_e) \right\},$$

где q_{α} и $n_{\alpha}(\mathbf{x}, t)$ – заряд и концентрация ионных компонент, $n_e(\mathbf{x}, t)$ и $\hat{\mathbf{P}}_e(\mathbf{x}, t)$ – концентрация и тензор давления электронов;

3) уравнение Максвелла заменяется уравнением Ампера: $\operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \Rightarrow \operatorname{rot} \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}$;

4) уравнение Фарадея $-\operatorname{rot} \mathbf{E} = \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$ сохраняется, но для расчета соленоидальной части электрического поля используется вытекающее из него и из уравнения Ампера уравнение

$$-\operatorname{rot} \operatorname{rot} \mathbf{E} = \mu_0 \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t},$$

в котором частная производная от плотности тока по времени $\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}$ выражается из обобщенного закона Ома через поля, а также концентрацию, плотность тока, тензор давления и их пространственные производные каждой компоненты плазмы.

Рассмотрено замыкание полученной системы уравнений для 6-ти наиболее актуальных вариантов системы уравнений переноса плазмы, и получены соответствующие замкнутые системы уравнений, в каждой из которых для определения полей получается система уравнений эллиптического типа, не содержащая частных производных по времени и определяющая поля по текущему пространственному распределению гидродинамических параметров плазмы и граничным условиям в рамках мгновенного дальнего действия. Такой подход позволяет разрабатывать глобальные полностью самосогласованные численные модели ионосферы и магнитосферы с физически корректным описанием электрического поля. Также он позволяет разрабатывать модели крупномасштабных процессов в магнитосфере и солнечном ветре с пространственным разрешением на уровне гирорадиуса тепловых ионов.

САМОСОГЛАСОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ТЕПЛОВОГО ПОТОКА В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ В РАМКАХ КВАЗИЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ

Шевелёв М.М.

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

Солнечный ветер является идеальной лабораторией для изучения процессов аномального переноса в бесстолкновительной плазме. В частности, спутниковые измерения в солнечном ветре показали, что тепловой поток оказывается в несколько раз ниже значений, предсказываемых столкновительной теорией. Было выдвинуто предположение, что тепловой поток ограничивается рассеянием электронов вистлерными волнами, которые раскачиваются так называемой неустойчивостью теплового потока. До недавнего времени вопрос эффективности вистлерных волн в ограничении теплового потока оставался открытым, поскольку отсутствовали измерения, которые бы позволили установить наличие, свойства и механизмы генерации вистлерных волн в солнечном ветре. Ситуация кардинальным образом изменилась в последние несколько лет, когда в солнечном ветре начали проводиться одновременные измерения плазмы и волновой активности с беспрецедентным временным разрешением на борту космических аппаратов Artemis и MMS. Спутниковые измерения позволили провести детальный статистический анализ свойств вистлерных волн и инициировали проведение моделирования нелинейной стадии развития неустойчивости теплового потока методом Particle-In-Cell (PIC).

Однако PIC-моделирование требует значительных технических ресурсов и не позволяет анализировать развитие неустойчивости на значительных временных промежутках в широком диапазоне параметров. Одной из возможных альтернатив PIC-моделированию является исследование эволюции распределения электронов как непрерывной функции. Спутниковые данные показывают, что ширина спектра возбуждаемых в солнечном ветре свистовых волн в подавляющем большинстве наблюдений удовлетворяет условию применимости квазилинейной теории.

Для моделирования эволюции функции распределения в рамках квазилинейной теории разработан вычислительный код, совмещающий в себе расчёт эволюции функции распределения, изменения инкремента волн и резонансных коэффициентов диффузии. Диффузия функции распределения рассчитывается в двумерном пространстве скоростей, а линейный инкремент неустойчивых колебаний вычисляется на каждом шаге по времени на основе полученной функции распределения.

В докладе описаны возможности программного кода по моделированию самосогласованной задачи о развитии неустойчивости в рамках квазилинейной теории и представлены первые результаты применения данного кода к задаче о развитии вистлерной неустойчивости теплового потока в солнечном ветре

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА БЫСТРОГО МАГНИТНОГО ЗВУКА В КРИВОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Петрашук А.В., Климускин Д.Ю.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, av.petrashchuk@mail.ru

Изучено распространение быстрого магнитного звука (БМЗ) в кривом магнитном поле. Магнитные оболочки являются концентрическими окружностями с постоянной кривизной силовых линий. В холодной неоднородной плазме ролью медленного магнитного звука (ММЗ) можно пренебречь. В этом случае имеется только две гидромагнитные (МГД) моды: альфвеновская и быстрый магнитный звук. Получено обыкновенное дифференциальное уравнение, описывающее волновое поле рассматриваемых МГД- волн в данной модели. С помощью этого уравнения исследован характер особенностей на магнитных поверхностях альфвеновского и БМЗ резонансов. Получено дисперсионное уравнение для БМЗ. Определены области распространения БМЗ. Продемонстрировано существенное расширение области распространения БМЗ в кривом магнитном поле. Найдены компоненты магнитного и электрического поля. Показано, что поведение БМЗ с учетом кривизны силовых линий становится точкой вторичного (логарифмического) резонанса. В противном случае резонанс отсутствует.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы РНФ.

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАЗВИТИИ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Гарасев М.А., Деришев Е.В.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, garasev@ipfran.ru

При помощи релятивистского кода ЕРОСН, осуществляющего моделирование кинетики плазмы методом частиц в ячейках был проведен ряд симуляций развития вейбелевской неустойчивости в двухтемпературной плазме. Рост магнитного поля наблюдался как с уровня численных шумов, так и с заданным изначально затравочным внешним полем. Проанализировано влияние нелинейных эффектов на эволюцию вейбелевской неустойчивости, особенно на стадии насыщения роста магнитного поля. Впервые была проанализирована эволюция функции плотности вероятности для амплитуды магнитного поля при развитии вейбелевской неустойчивости.

Показано, что для малых начальных значений анизотропий функции распределения частиц по импульсам (до $A \sim 0.5$) эволюция магнитного поля всюду носит квазилинейный характер. Плотность вероятности амплитуды магнитного поля всюду остается почти гауссовой (что свидетельствует о независимости эволюции отдельных мод), а в спектре мощности практически невозможно различить генерацию вторичных пиков (что свидетельствует о слабости нелинейного взаимодействия мод). Для больших анизотропий генерация вторичных пиков за счет четырехволнового взаимодействия вейбелевских мод, хоть и заметна вблизи максимума магнитного поля, но, в то же время, энергия содержащаяся в этих нелинейных модах всегда мала. Выяснено, что на стадии насыщения, плотность вероятности для амплитуды магнитного поля перестает быть гауссовой, и становится более гладкой (коэффициент эксцесса становится сильно отрицательным). На стадии затухания магнитного поля плотность вероятности для амплитуды снова возвращается к гауссовой форме.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-72-10111.

1. Garasev, M. A.; Derishev, E. V. // Radiophysics and Quantum Electronics 2018. V. **60**. p. 931.

НЕУСТОЙЧИВОСТИ ЗА ФРОНТОМ МГД УДАРНОЙ ВОЛНЫ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ С ТЕПЛОВЫМИ ПОТОКАМИ КАК МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Кузнецов В.Д., Осин А.И.

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

Рассмотрены условия возникновения шланговой, зеркальной и ионно-звуковой неустойчивостей за фронтом МГД ударной волны в бесстолкновительной плазме с тепловыми потоками. Для параллельной ударной волны показано, что устойчивая перед фронтом ударной волны плазма может стать неустойчивой за фронтом, приводя к генерации турбулентности. Определены области параметров плазмы перед фронтом ударной волны, для которых имеет место возникновение рассмотренных неустойчивостей за фронтом ударной волны.

1. Kuznetsov V.D., Osin A.I. // Phys. Lett. A 2018. V. **382**. P. 2052
2. Кузнецов В.Д., Осин А.И. «Солнечная и солнечно-земная физика – 2019». Санкт-Петербург, Пулково, 7-11 октября. Стр.257-260.
3. Kuznetsov V.D., Osin A.I. // Phys. Lett. A (submitted).

Пятнадцатая ежегодная конференция "Физика плазмы в солнечной системе", 10 по 14 февраля 2020 г. в ИКИ РАН

ГЕНЕРАЦИЯ ДЖЕТОВ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ.1

Онищенко О.Г.^{1,2}, Похотелов О.А.², Беляев В.С.³, Федун В.Н.⁴, Horton W.⁵, Ерохин Н.С.²

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, onish@ifz.ru

²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

³University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom

⁴ЦНИИМАШ, Королев, Моск. обл, Россия

⁵University of Texas at Austin, Texas, USA

Динамику развития вихрей можно условно разделить на три этапа: генерацию, существование вихрей в квазистационарном состоянии и затухание. Затухание вихрей может быть обусловлено повышенной вязкой диссипацией и влиянию эффектов трения в приповерхностном слое. В данной работе основное внимание уделяется изучению в рамках МГД приближении идеальной плазмы модели генерации джетов. Обсуждению структуры полей скорости и магнитного поля посвящена следующая работа [1].

В МГД приближении исследуется модель генерации аксиально симметричных вихрей в бездиссипативной, неравновесно стратифицированной плазме, аналогично модели генерации вихрей в нейтральной атмосфере, исследованной авторами ранее [2]. В основу модели положено предположение о конвективной неустойчивости Шварцшильда в плазме и условие вмерзнутости силовых линий магнитного поля в вещество. Показано, что на начальной стадии развития неустойчивости в плазме генерируются конвективные ячейки и из них возникают джеты с полоидальными полями скорости и магнитного поля и тороидальным электрическим током. Показано, что плазма с зародышевой тороидальной завихренностью на втором этапе развития характеризуется взрывным характером генерации тороидального движения. Наряду с исследованием динамики поля скоростей и магнитного поля исследуется динамика и структура возникающих электрических токов. Обсуждается приложение полученных результатов для интерпретации лабораторных экспериментов.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект №18-29-21021 и Проекта Минобрнауки КП19-270.

1. Онищенко О.Г., Похотелов О.А., Беляев В.С. и др. // Тезисы Конф. «Физика плазмы в солнечной системе», 2020.

2. [Onishchenko](#) O. G., Pokhotelov O. A., Horton W., Fedun V. // J. Geophys. Res.: Atmosph. 2016. V. **121**, P. 7197-7214, doi:10.1002/2016JD025961.

СТАЦИОНАРНЫЕ ВИХРИ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

Онищенко О.Г.^{1,2}, Похотелов О.А.², Беляев В.С.³, Федун В.Н.⁴, Horton W.⁵, Ерохин Н.С.²

¹ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, onish@ifz.ru

²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия

³University of Sheffield, Sheffield, United Kingdom

⁴АО «ЦНИИмаш», Королев, Моск. обл, Россия

⁵University of Texas at Austin, Texas, USA

В рамках идеальной гидродинамики в условиях несжимаемости жидкости и вмороженности магнитного поля построена новая аналитическая модель, позволяющая изучать структуру ограниченных по высоте тонких аксиально симметричных вихревых нитей. В отличие от модели неограниченных по высоте магнитных торнадо [1], и по этой причине, ограниченной интерпретацией вихрей только у основания, целью данных исследований является создание новой модели вихрей конечной высоты. Новая малопараметрическая модель вихрей позволяет исследовать структуру скоростей, магнитного поля и электрических токов.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект №18-29-21021 и Проекта Минобрнауки КП19-270.

1. Onishchenko O. G., Fedun V., Smolyakov A., Horton W., Pokhotelov O. A., and Verth G. // Physics of Plasmas, 2018, V. 25, P. 054503; doi: 10.1063/1.5023167.

МИКРОВОЛНОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ, ГЕНЕРИРУЕМОЕ ПРИ РАЗВИТИИ КИНЕТИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЕ В МАГНИТНОЙ ЛОВУШКЕ

Викторов М.Е.¹, Голубев С.В.¹, Мансфельд Д.А.¹, Eliasson B.², Speirs D.C.², Phelps A.D.R.², Bingham R.², Cross A.W.², Ronald K.²

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mikhail.viktorov@appl.sci-nnov.ru

²Университет 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. Одним из наиболее эффективных механизмов генерации электромагнитного излучения в неравновесной магнитоактивной плазме является механизм, связанный с развитием кинетических неустойчивости плазменных волн. Большая эффективность этого механизма обусловлена низкой групповой скоростью плазменных волн (по сравнению с электромагнитными), что обеспечивает длительное время взаимодействия волн с неравновесными частицами и позволяет, в конечном итоге, достигать высокого интегрального усиления. При этом наблюдаемое собственное излучение плазмы формируется за счет различных механизмов трансформации плазменных волн в электромагнитные волны, например, в результате рассеяния на тепловых ионах. Ввиду универсальности физических механизмов генерации излучения, существенные аспекты природных систем могут быть воспроизведены в лабораторных магнитных ловушках в контролируемых и воспроизводимых условиях.

В работе впервые будет проведено теоретическое и экспериментальное исследование генерации волн в плотной магнитоактивной плазме 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.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и КО в рамках научного проекта № 19-52-10007.

К РАСЧЕТУ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ СЛАБОИОНИЗОВАННОЙ ПЛАЗМЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

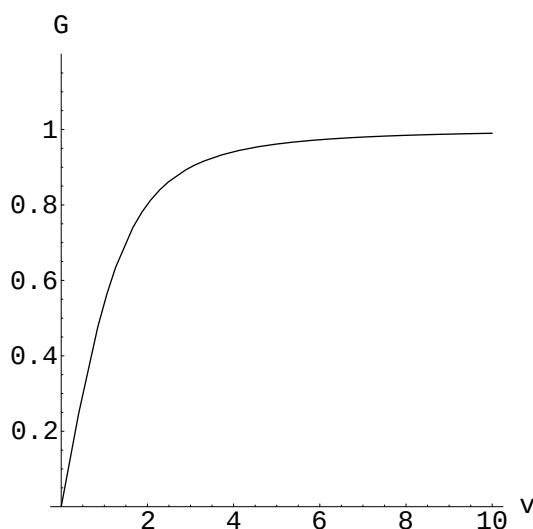
В.Л. Красовский

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

Обсуждаются анализ и решение интегрального уравнения Больцмана для определения функции распределения электронов в слабом электрическом поле. За основу расчета интеграла столкновений выбрана простая модель элементарного акта соударения электрона с нейтральной частицей газа (атомом или молекулой) как абсолютно упругого удара жестких шариков. При этом эффективное сечение рассеяния электрона тяжелой частицей и средняя длина свободного пробега электрона являются постоянными. Найденное решение кинетического уравнения сопоставляется с хорошо известным решением соответствующего приближенного дифференциального уравнения Фоккера-Планка диффузионного вида. Существенное отличие двух подходов проявляется в поведении электронной функции распределения при скоростях электронов сравнимых с тепловой скоростью атомов газа. Коррекцию известного выражения для анизотропной добавки к равновесной функции распределения, установленного ранее в диффузионном приближении в рамках линейной по полю теории, можно осуществить формальным умножением его на функцию

$$G(v) \equiv \frac{(\pi/2)^{1/2} v^2}{v e^{-v^2/2} + (1+v^2)I(v)} \quad , \quad I(v) \equiv \int_0^v dx \exp(-x^2/2) \quad ,$$

где в качестве единицы измерения скорости электрона v выбрана тепловая скорость частиц газа $V_T = (T/M)^{1/2}$. График функции G показан на рисунке.



В результате проведенных расчетов определены также ядра интегральных уравнений Больцмана необходимые для решения подобных и других задач физической кинетики в рамках принятой модели столкновений.

ПОГЛОЩАЮЩАЯ СФЕРА В ПЛАЗМЕ С МАКСВЕЛЛОВСКИМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ПРЯМОМ ЧИСЛЕННОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

Красовский В.Л., Киселёв А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, aleksandr.kiselyov@gmail.com

Изучение возмущения бесстолкновительной плазмы вокруг поглощающего заряд сферического тела – известная, но не до конца изученная задача теории электрического зонда. Длительное время оставался открытым вопрос об определении параметров захваченных частиц, движущихся по финитным траекториям, и их вклада в экранирование заряженного тела, в том числе для плазм разного состава.

По предположению в некоторый момент времени в бесстолкновительной плазме с максвелловским распределением плазмы возникает сферическое поглощающее заряд тело. Далее рассматривается задача с начальными условиями, описываемая системой уравнений Власова-Пуассона. Целью является изучение динамики плазмы и процесса приобретения заряда сферой вплоть до асимптотического состояния устойчивого равновесия. Для рассматриваемой задачи характерны сильная нелинейность и невозможность задания граничных условий для захваченных частиц без проведения полного решения, что крайне осложняет и ограничивает аналитическое рассмотрение. Поэтому был разработан код для численного моделирования динамики этой физической системы методом «частиц-в-ячейке», часто успешно применяемым в сильно нелинейных плазменных задачах. Использование канонических уравнений движения в условиях сферической симметрии существенно упрощает рассмотрение.

В данном докладе обсуждается влияние состава плазмы, который проявляется как отношение масс ионов и электронов, на электродинамику системы. Были рассмотрены три вида ионов (H^+ , He^+ , Ne^+) для двух разных наборов значений физических параметров системы. Получены и проанализированы пространственно-временные зависимости электрического поля при выбранных параметрах в состоянии равновесия и построены распределения плотности электронов и ионов. Построена функция распределения ионов на фазовой плоскости. Исследована зависимость величины асимптотического заряда сферы и относительного заряда (отношения заряда облака захваченных частиц к заряду сферы) от отношения масс электронов и ионов в плазме.

3D моделирование транзитных поглощений компонент планетарного ветра горячего Нептуна HD 209458b

Руменских М. С., Шайхисламов И. Ф., Мирошниченко И. Б., Березуцкий А. Г.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, marina_rumenskikh@mail.ru

Интерпретация наблюдательных данных транзитных экзопланет требует комплексного численного моделирования процессов, происходящих в окружающей космической среде. Численное решение систем уравнений, описывающих взаимодействие атмосферного ветра экзопланеты с потоком плазмы ее родительской звезды, позволяют получить такую информацию о данной системе как температура, скорость и плотность звездного ветра, а также состав и скорость планетарного ветра путем сравнения синтетических спектральных и транзитных кривых с измерениями на космическом телескопе Хаббл, а также наземными телескопами.

Порядка 1% экзопланет являются так называемыми горячими Юпитерами или теплыми Нептунами. Они вращаются экстремально близко к родительской звезде, причем многие из них на расстояниях менее 0,05 а.е. Из-за столь близкого расположения планетарная атмосфера ионизируется, нагревается и ускоряется до сверхзвуковых скоростей. Одной из наиболее изученных транзитных планет данного класса является HD 209458b [1]. Первые транзитные кривые, полученные при прохождении этой планеты перед диском родительской звезды, показали поглощение линии Ly- α на уровне порядка 15% [2].

Однако атмосфера данной планеты, как показали наблюдения, состоит не только из водорода. Спектры, полученные телескопом Хаббл, показали поглощение порядка 10% в резонансных линиях атомов кислорода, ионов углерода и кремния (OI, CII и SiIII). В нашей работе используется 3D газодинамическая модель с учетом процессов рекомбинации и плазмо-фотохимии плазменных компонент [3]. Результаты численного моделирования, представленные в данной работе, демонстрируют распределения плотности различных составляющих планетарного ветра HD 209458b, а также скоростные, температурные и спектральные профили. Нами впервые показано, что наблюдаемое поглощение объясняется сверхзвуковым планетарным течением за пределами полости Роша, которое увлекает с собой более тяжелые элементы, присутствующие в верхней атмосфере планеты. Количественное сравнение указывает на то, что содержание углерода и кислорода в атмосфере HD 209458b соответствует стандартным Солнечным значениям.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №18-12-00080

1. Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., & Mayor, M. // ApJL, 1999, V. 529, L45
2. Vidal-Madjar, A., Lecavelier des Etangs, A., Désert, J.M., et al. // 2003, Nature, 422, 143
3. Shaikhislamov I. F., Khodachenko M. L., Lammer H., et al. // ApJ, 2016, 832, N2, 173.

К СТРУКТУРЕ ГРАНИЦЫ ДИАМАГНИТНОЙ ОБЛАСТИ В ЭЛЕКТРОННОМ КИНЕТИЧЕСКОМ ОПИСАНИИ

В.М. Губченко

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия (ua3thw@appl.sci-nnov.ru)

В одномерном кинетическом приближении определено индукционное электромагнитное (э.м.) поле, от движущейся сквозь плазму токовой системы (ТС) в виде 1D слоя, описывающее поле внутри границ «диамагнитного облака» (ДО). ДО в магнитосфере, в короне Солнца и в лазерной плазме - это неоднородная, динамичная плазменная э.м. структура, образованная в результате амбиполярного разлета (со сверхзвуковой скоростью, но меньше тепловой электронной) от источника в фон поперек внешнего магнитного (ВМ) поля удержания высокоэнергичной плазмы с дальнейшей остановкой разлета ВМ полем или прорыва ВМ поля. В результате такого э.м. процесса образуются разрывы и выталкивание силовых линий магнитного поля из ДО, формируется на границе квазицилиндрическая ТС. ТС обусловлена поляризацией (диамагнетизм) плазмы и ускорением «резонансных» электронов (резистивность плазмы), возбуждением МГД волн.

На периферии ДО частицы плазмы замагничены и плазменное бета мало и структура ТС рассматривается в рамках МГД на основе магнито-ламинарного механизма (МЛМ) и определяется э.м. МГД масштабами дисперсии плазмы. Внутри ДО плазма незамагничена и плазменное электронное бета высокое, выше вычисленных критических значений, определяющих незамагниченность ДО по индукционной моде. Здесь формируется ТС, структурированная масштабами кинетической природы.

Токонесущая бесстолкновительная и горячая плазма ТС, характеризуемая функциями распределения частиц (ФРЧ), задана параметрами анизотропии и асимметрии. Первый определяет диамагнитные свойства плазмы, выражается аддитивно через поступательную скорость, температурную анизотропию, взаимопроникающие потоки плазм и электрические токи, Параметр асимметрии ФРЧ выражается через скорость разлета; определяет аномальные резистивные свойства плазмы. Эти параметры обуславливают существование больших по отношению к масштабам МГД диамагнитного и аномального э.м. скин-масштабов кинетической природы.

Результирующая ТС состоит из двух частично перекрывающихся частей: «холодная ТС» МГД мод периферии ДО из захваченных магнитным полем низкоэнергичных частиц источника и фона и индукционная «горячая ТС» внутри ДО. «Горячая ТС» возбуждена от потока пролетных незамагниченных горячих электронов из источника на «холодную ТС», состоящего из групп резонансных и нерезонансных электронов, описываемых кинетически на основе э.м. индукционной моды.

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), Министерством образования и науки РФ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы" субсидия #14.607.21.0196, УИН проекта RFMEFI60717X0196, программой фундаментальных исследований РАН № КП19-270 "Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований".

Лит.: 1. D. Winske et al, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2019, v. 5, a. 51, p. 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, 1009-1025, 2015. DOI: 10.1134/S0016793215080101

ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В ГЕЛИОСФЕРНОМ ПЛАЗМЕННОМ СЛОЕ

Е.В. Маевский¹, Х.В. Малова^{2,3}, Р.А.Кислов^{3,4}, В.Ю. Попов^{5,6,3}, А.А. Петрукович³, О.В. Хабарова⁴, Л.М. Зеленый³

¹ Финансовый университет при правительстве РФ, Москва, Россия

² НИИ ядерной физики МГУ, Москва, Россия

³ Институт Космических исследований РАН, Москва, Россия, kr-rk@bk.ru

⁴ Институт Земного Магнетизма и Распространения Радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва, Россия

⁵ Физический факультет МГУ, Москва, Россия

⁶ Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

При пересечении космическими аппаратами в солнечном ветре гелиосферного плазменного слоя (ГПС), разделяющего крупномасштабные магнитные сектора противоположной направленности, практически всегда наблюдаются многократные быстрые колебания знака радиальной компоненты магнитного поля, свидетельствующие о смене знака азимутальной плотности тока внутри ГПС. Предложены возможные механизмы формирования многослойных токовых структур в ГПС. Согласно одной из гипотез, нейтральная линия на Солнце может быть слоистой из-за влияния пояса стримеров. Если слоистость не исчезает до определённого расстояния, соответствующего альфвеновской поверхности, то она может не исчезнуть и на больших гелиоцентрических расстояниях. В рамках самосогласованной МГД модели, в которой на сфере вокруг Солнца задаются магнитное поле с тремя близлежащими нейтральными линиями, были построены магнитоплазменные равновесия, описывающие слоистый ГПС с чередующимися по направлению азимутальными токами. Геометрически магнитное поле вблизи слоистого ГПС напоминает характерные для солнечных стримеров шлемообразные конфигурации, поэтому структуру в целом можно называть «гелиосферным стримером». Вероятно, солнечные и гелиосферные стримеры образуют единый объект. Было исследовано влияние углового расстояния между нейтральными линиями в граничных условиях на структуру ГПС на различных гелиоцентрических расстояниях. В зависимости от изначальной ширины гелиосферного стримера и расстояния от Солнца, пики концентрации на токовых слоях внутри ГПС могут как сливаться, так и быть отдельными. Последствия для интерпретации результатов наблюдений в солнечном ветре обсуждаются.

СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР В СОВРЕМЕННОМ 3-D ПОНИМАНИИ. ИЕРАРХИЯ МАСШТАБОВ И ПРОЦЕССОВ.

Хабарова О.В.¹, Зелёный Л.М.², Кузнецов В.Д.¹, Обридко В.Н.¹, Малова Х.В.^{2, 3},
Григоренко Е.Е.², Кислов Р.А.¹, Мингалев О.В.⁴, Мингалев И.В.⁴, Попов В.Ю.^{2, 5}

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

² ИКИ РАН, г. Москва, Россия

³ НИИЯФ МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴ ПГИ, г. Апатиты, Россия

⁵ Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия

Многие десятилетия солнечный ветер рассматривался как некая упрощенная структура, процессы в которой можно свести к двумерным (2D) в силу радиальной симметрии расширяющейся плазмы. Не только мелкомасштабные, кинетические, но и основные крупномасштабные структуры, наблюдаемые в гелиосфере – корональные выбросы масс (КВМ), потоки из корональных дыр, ударные волны и гелиосферный токовый слой (ГТС) – также продолжительное время описывались в рамках 2D представлений и соответствующих моделей. Причиной этого отчасти являлось то, что немногочисленные аппараты, запущенные в межпланетное пространство, позволяли измерять характеристики плазмы лишь в одной точке и не могли восстановить трехмерную (3D) картину процесса.

3D свойства и структура истекающей из Солнца плазмы были приблизительно известны лишь в ближней зоне (до десятков радиусов Солнца), покрытой наблюдениями коронографов. Только в начале XXI века были созданы аппараты, позволяющие взглянуть на солнечный ветер практически глазами человека, а именно, в белом (видимом) свете. Первый уникальный аппарат этого класса, Solar Mass Ejection Imager (SMEI), запущенный на орбиту Земли в 2003г., сразу изменил представления о солнечном ветре, показав, что основные крупномасштабные потоки активно взаимодействуют друг с другом и с ГТС, при этом изменяются их траектории и структуры. Дополнительное привлечение межпланетного зондирования методом межпланетных сцинтилляций (interplanetary scintillation (IPS) tomography) к восстановлению текущей 3D картины межпланетного пространства открыло новую эру в исследованиях солнечного ветра. За этим последовал запуск двух одинаковых аппаратов STEREO Ahead и STEREO Behind с heliospheric imagers – приборами, аналогичными SMEI, но позволяющими смотреть на Солнце с разных углов.

Сравнение этих 3D реконструкций с in situ наблюдениями и с 3D картинками, полученными путем МГД-моделирования с учетом изначальных условий на Солнце (ENLIL modeling) позволило сменить взгляды на солнечный ветер с 2D на 3D. Получение фундаментальных знаний о механизмах формирования, эволюции и свойств ключевых структур солнечного ветра необходимо как для прогнозирования космической погоды, так и для понимания общих законов функционирования гелиосферы как единой системы, включающей в себя квазиустойчивые МГД-образования и магнитосферы планет, а также мелкомасштабные структуры, иерархически связанные с крупномасштабными.

Работа коллектива поддержана грантом РФФ 20-42-04418.

НАБЛЮДЕНИЕ ВОЗМУЩЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУКТУР В ОКРЕСТНОСТИ СОЛНЦА И ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДАМИ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ И ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.

Ефимов А.И., Луканина Л.А., Коломиец С.Ф., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, efimov@ms.ire.rssi.ru

Эксперимент по радиозондированию околосолнечной плазмы сигналами космического аппарата (КА) *Mars Express* в 2013г. был осуществлен в период с 4 марта по 31 мая. Измерялись флуктуации частоты радиоволн сантиметрового диапазона. В течение периода измерений наблюдались резкие усиления флуктуаций, как на стадии захода КА за Солнце (восточный лимб), так и на стадии выхода из-за него (западный лимб). Как показал анализ локальных наблюдений солнечной активности, таких как усиление потока рентгеновского излучения и данные коронографа SOHO LASCO, это объясняется прохождением через трассу радиосвязи КА с Землей возмущенных плазменных потоков, генерируемых в короне Солнца. События, произошедшие вблизи Солнца, сопоставлялись с резкими возрастаниями значений протонной концентрации и магнитной индукции вблизи орбиты Земли по данным спутника WIND. Временное запаздывание между событиями, наблюдавшимися в околосолнечной и околоземной плазме, показывает, что причиной возмущений является повышенная активность одной и той же корональной области, вращающейся вместе с Солнцем.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0030-2019-0008.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА ФАЗЕ СПАДА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ

Чашей И.В., Лебедева Т.О., Тюльбашев С.А., Субаев И.А.

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, chashey@prao.ru

По данным мониторинга межпланетных мерцаний 2016-2017 гг. проведен анализ динамики уровня мерцаний в периоды, предшествующие приходу к Земле крупномасштабных возмущений солнечного ветра, вызвавших сильные геомагнитные бури. Для большинства событий динамика уровня мерцаний в основном определялась перемещением коротирующих возмущений. В двух событиях, на фоне коротирующих возмущений наблюдались выбросы корональной массы, возбуждавшиеся в короне вблизи западного лимба Солнца. В одном из этих случаев магнитная буря была связана с коротирующим потоком, в другом - с мощным распространяющимся возмущением. Показано, что за 3-4 суток до прихода сжатой части коротирующих возмущений к Земле в вечернем секторе начинается ослабление мерцаний, которое может быть интерпретировано как существенное понижение уровня мелкомасштабной турбулентности плазмы в протяженной области перед фронтальной частью возмущения. Данные мониторинга межпланетных мерцаний показывают, что одновременно с магнитной бурей происходит усиление секундных мерцаний, которое наиболее четко фиксируется, если буря происходит в вечерние или ночные часы. Для рассмотренных событий сопутствующие магнитной буре усиления мерцаний связаны с повышениями уровня мелкомасштабных флуктуаций в примыкающих к Земле областях солнечного ветра, если буря возбуждается коротирующим возмущением, и с возмущенной ионосферой, если буря возбуждается возмущением вспышечной природы.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ МЕТОДОМ КОЛЬЦА СТАНЦИЙ

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

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

Метод кольца станций позволяет получать свойства углового распределения космических лучей без разложения на гармоники и ежечасное долготное распределение интенсивности космических лучей, не прибегая к его моделированию. Использование метода кольца станций наглядно показывает поведение вариаций КЛ на различных станциях, что дает возможность исследовать такие особенности Форбуш-эффектов как предвестники, анизотропное начало, необычное поведение вариаций КЛ внутри возмущений солнечного ветра и др.

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ 07.03.2011 И 20.02.2014

Власова Н.А., Тулупов В.И.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия
nav19iv@gmail.com

Представлены результаты сравнительного анализа двух солнечных протонных событий 07.03.2011 и 20.02.2014, которые ассоциируются с солнечными вспышками, близкими по мощности и расположенными на близких долготах на западной стороне солнечного диска: 07.03.2011 – балл M3.7/SF и координаты S22W67; 20.02.2014 – балл M3.0/SN и координаты S15W73. Исследования основаны на экспериментальных данных, полученных с КА ACE, расположенного в межпланетном пространстве в точке L1, и ИСЗ GOES, расположенного на геостационарной орбите внутри магнитосферы Земли. Проведен сравнительный анализ особенностей временных профилей потоков солнечных энергичных протонов, по данным КА ACE и ИСЗ GOES, и параметров межпланетной среды: скорости и плотности солнечного ветра и величины и направления межпланетного магнитного поля (данные КА ACE).

Показано, что основные различия во временных профилях потоков солнечных протонов 07.03.2011 и 20.02.2014 связаны с влиянием межпланетной среды на потоки частиц. Наблюдается частичная модуляция потоков протонов в соответствии с вариациями параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Результаты сравнительного анализа временных вариаций потоков солнечных протонов с $E > 10$ МэВ и $E > 30$ МэВ и B_z - и B_y -компонент межпланетного магнитного поля 20 февраля 2014 г. свидетельствуют об определяющей роли структуры межпланетного магнитного поля на формирование особенностей временных профилей потоков частиц.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают ранее высказанные предположения о том, что фундаментальной структурой в гелиосфере является плазменно-магнитная трубка [1] и что распространение солнечных космических лучей в межпланетной среде происходит в квазистационарных структурах межпланетного магнитного поля [2], а в процессе распространения солнечные частицы могут частично захватываться новыми структурами межпланетного магнитного поля [3].

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00264.

Литература

1. Вернов С.Н., Тверской Б.А., Вакулов П.В., Горчаков Е.В., Логачев Ю.И., Любимов Г.П. Об аномальной анизотропии потока солнечных космических лучей в сентябре 1973 г. // *Космические исследования*. 1976. Т 14. № 2. С. 239-247.
2. Любимов Г.П., Григоренко Е.Е. Об отражательной модели солнечных космических лучей // *Космические исследования*. 2007. Т. 45. № 1. С. 12-19.
3. Тулупов В.И., Григоренко Е.Е., Власова Н.А., Любимов Г.П. Движение и перенос солнечных космических лучей в гелиосферных ловушках на примере события 28-31.I.2001 // *Космические исследования*. 2012. Т.50. №6. С. 427-434

МГД НЕУСТОЙЧИВОСТИ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ПЛАЗМЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Джалилов Н.С., Гусейнов С.Ш., Исмаиллы Р.Ф.

Шамахинская Астрофизическая Обсерватория НАН Азербайджана, namigd@mail.ru

На основе 16-моментных МГД-уравнений рассмотрено распространение линейных волн в анизотропной однородной космической плазме. Получено общее дисперсионное уравнение с учетом двух компонентов плазмы (электроны и протоны) и теплового потока вдоль магнитного поля. Полученное дисперсионное уравнение является обобщением ранее исследованных случаев, когда плазма являлась ионной. В пределах продольного распространения дана классификация волновых мод, которые полностью соответствуют известным модам из низкочастотной кинетической физики бесстолкновительной плазмы. Проанализированы шланговые и зеркальные неустойчивости. Показано, что учет электронов существенно меняет инкременты и условия возникновения неустойчивостей [1].

Исследована сдвиговая МГД неустойчивость плазмы типа Кельвина-Гольмгольца в контактной поверхности медленных и быстрых течений, которая возникает у CIR (Corotating Interacting Regions), являющихся крупномасштабными структурными элементами солнечного ветра. Получено волновое уравнение для произвольного переходного профиля потоков с учетом теплового потока вдоль поверхности и анизотропии плазмы относительно направления магнитного поля. С введением граничных условий получено и решено общее дисперсионное уравнение для скорости течения с профилем Хевсайда. Рассмотрены критерии и инкремент роста анизотропных МГД КН неустойчивостей в зависимости от параметров [2].

1. Dzhaliyov N. S., Huseinov S. Sh. // Plasma Phys. Reports 2019. V. **45**, P. 685.
2. Ismayilli R.F., Dzhaliyov N.S., Shergelashvili B.M., Poedts S., Pirgulyev M.Sh.// Phys. Plasmas. 2018. V. **25 (6)**, P. 062903.

О модели гелиосферного магнитного поля для исследования долговременных вариаций интенсивности ГКЛ

Крайнев М.Б., Калинин М.С., Свиржевский Н.С.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия; mkrainev46@mail.ru

Аннотация

Долговременные (11- и 22- летние) вариации интенсивности ГКЛ были обнаружены практически одновременно (1950-е годы) с теоретическим предсказанием существования сверхзвукового солнечного ветра и спирального гелиосферного магнитного поля (ГМП). За прошедшие 60 лет сформулированы основные закономерности долговременных вариаций ГКЛ около Земли, разработана теория их образования, результаты расчётов в рамках которой описывают большинство указанных закономерностей. В то же время гелиосфера в целом из-за её огромных размеров обследована ещё недостаточно и к используемым для моделирования поведения ГКЛ простым моделям солнечного ветра и ГМП (обычно модель Е. Паркера) есть много вопросов.

В докладе рассмотрены среднесуточные данные по характеристикам солнечного ветра и гелиосферного магнитного поля (ГМП), полученным на КА Ulysses и Voyager 1, 2, и сравнение их с общепринятой для исследования модуляции космических лучей моделью Паркера. Сделан предварительный вывод, что во внутренней гелиосфере ($r < 5$ а.е.) модель Паркера работает, как ей и полагается, при постоянстве и однородности по долготе скорости солнечного ветра (т.е. вне зоны секторной структуры ГМП) и не работает внутри этой зоны. В промежуточной и дальней гелиосфере ($10 < r < 90$ а.е.) модель Паркера описывает данные неудовлетворительно, однако в этой области точность измерения ГМП на Voyagers недостаточно высока.

В то же время способность современных программных пакетов для моделирования распространения ГКЛ в гелиосфере, использующих модель Паркера, описывать основные наблюдаемые около Земли закономерности в поведении ГКЛ свидетельствует в пользу этой модели ГМП.

**ПРОЯВЛЕНИЕ МИНИМУМА МЕЖДУ 24 И 25 ЦИКЛАМИ СОЛНЕЧНОЙ
АКТИВНОСТИ В СОЛНЕЧНЫХ И ГЕЛИОСФЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ
И В ИНТЕНСИВНОСТИ ГКЛ.**

Калинин М.С., Крайнев М.Б., Свиржевская А.К., Свиржевский Н.С.

ФИАН им. П.Н. Лебедева, г. Москва, Россия, E-mail: kalininms@lebedev.ru

В докладе проанализированы основные солнечные и связанные с ними гелиосферные характеристики, важные с точки зрения поведения интенсивности галактических космических лучей. Прогнозы, основанные на физических условиях в гелиосфере в период предшествующего минимума 23/24, в минимуме 24/25 во многом не оправдались. Несмотря на схожесть многих гелиосферных характеристик в минимумах этих циклов, не подтверждается традиционная закономерность: интенсивность ГКЛ в минимумах с положительной полярностью гелиосферного магнитного поля (ГМП) выше уровня интенсивности в минимумах с $A = -1$ ($A = \pm 1$ - знак ГМП в северном полушарии). Сравнительный анализ данных измерений показывает, что такое поведение интенсивности связано с более высоким уровнем напряжённости ГМП в минимуме 24/25 цикла с $A = +1$ по сравнению с минимумом 23/24 цикла с $A = -1$. Расчёты, основанные на решении уравнения модуляции, с коэффициентами переноса, сформированными на основе экспериментальных данных, подтверждают такой вывод.

АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В 21-24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛАХ

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

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

Вариации параметров солнечного ветра (СВ) на масштабах солнечных циклов (СЦ) являются одними из важных характеристик Солнца. С одной стороны, эти параметры позволяют прогнозировать динамику Солнца на вековых масштабах, а с другой стороны, дают возможность более краткосрочных предсказаний поведения геомагнитной активности. Вариации параметров СВ в таких исследованиях могут зависеть от нескольких причин: (1) изменения числа различных типов СВ в различных СЦ, (2) вариации числа различных типов СВ со сменой фаз в СЦ в различных СЦ и (3) изменение параметров СВ в различных типах СВ при переходе от одного СЦ к другому СЦ и от одной фазы к другой. Имеющийся у нас каталог крупномасштабных типов СВ за 1976-2018гг. (см. сайт <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/> [1]) охватывает период с 21-го по 24-й СЦ и позволяет выполнить анализ указанных трех причин, так как мы можем сгруппировать данные о параметрах СВ для разных типов СВ и на разных фазах разных СЦ. Число возмущенных типов СВ в каждом цикле меняется обычным образом: число событий, связанных с СМЕ, имеет максимум вблизи максимума цикла, а области сжатия на фронте взаимодействия быстрых потоков из корональных дыр с предшествующим медленным потоком из области корональных стримеров чаще наблюдаются в минимуме цикла. Предварительные данные показывают, что с ростом номера СЦ (1) падает число возмущенных типов СВ и (2) в каждом типе СВ и для разных фаз СЦ уменьшаются значения плазменных параметров и ММП.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 16-12-10062.

1. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г. // Космич. исслед. 2009. Т. 47 № 2. С. 99–113. <https://doi.org/10.1134/S0010952509020014>

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА В ОБЛАСТЯХ КОМПРЕССИИ ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

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.³, Немечек З.³, Прех Л.³

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

³ Charles University in Prague, Czech Republic.

Турбулентность в солнечном ветре, как правило, описывается в рамках подходов развитой турбулентности. Однако наблюдения показывают, что развитие турбулентности может сдерживаться границами между различными крупномасштабными структурами в межпланетном околоземном пространстве, что приводит к отличиям спектров флуктуаций от вида, предсказанного общепринятыми теориями. Подобная ситуация наблюдается, например, в магнитослое - области компрессии плазмы солнечного ветра за околоземной ударной волной [1]. Предполагается, что аналогичная ситуация может наблюдаться и в возмущенных областях сжатия плазмы между потоками различных скоростей в солнечном ветре, например, в Sheath областях перед межпланетными проявлениями корональных выбросов, или в так называемых CIR областях (областях взаимодействия высокоскоростного потока из корональных дыр и низкоскоростного потока из области корональных стримеров). С помощью каталога крупномасштабных явлений в солнечном ветре (<ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/> [2]) в работе отобран ряд интервалов наблюдений прибора БМСВ на КА Спектр-Р в областях компрессии плазмы в солнечном ветре и проанализированы характеристики турбулентного потока на магнитогидродинамических и кинетических масштабах. Проведено статистическое сравнение полученных характеристик с аналогичными характеристиками в медленном невозмущенном солнечном ветре. Также на отдельных примерах рассмотрено, как в динамике меняются характеристики спектра флуктуаций при переходе из спокойного солнечного ветра в область компрессии. Показано, что области сжатия в солнечном ветре, как правило, могут быть охарактеризованы более мощными спектрами флуктуаций с быстрым их спадом на кинетических масштабах, тогда как на инерционных масштабах изменения почти не наблюдаются. Предполагается, что в областях компрессии происходит более интенсивная диссипация и нагрев плазмы. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-02-00177а.

1. Rakhmanova, L., Riazantseva, M., Zastenker, G., Verigin, M. // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2018. V.123. P.5300-5314. <https://doi.org/10.1029/2018JA025179>

2. Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г. // Космич. исслед. 2009. Т. 47 № 2. С. 99–113. <https://doi.org/10.1134/S0010952509020014>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ПОТОКА ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ОБЛАСТИ ОВЕРШУТА

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, измеряющего параметры плазмы солнечного ветра с временным разрешением ≈ 0.031 сек., исследовалась структура фронтов межпланетных ударных волн. Особое внимание было уделено периодическим повышениям (овершуты) и провалам (андершуты) в величине потока ионов или магнитного поля относительно их средних значений за рампом. Проведено сравнение с величиной овершута в магнитном поле и числом Маха.

На основании анализа 17 пересечений фронтов межпланетных ударных волн, в которых наблюдались овершуты в величине потока ионов и магнитного поля, было показано, что величина овершута магнитного поля, в среднем, меньше аналогичной величины в потоке ионов солнечного ветра, что связано с различным временным разрешением измерений. Получено, что величина овершута потока ионов возрастает с ростом числа Маха так же, как и величина овершута магнитного поля. 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 также, что оценки длины волны колебаний потока ионов хорошо коррелируют с величиной гирорадиуса захваченных ионов.

Работа была выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-12-10062.

Поведение He^{++} на фронте межпланетной ударной волны по данным прибора БМСВ

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

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

Рассматривалась тонкая структура фронтов Межпланетных Ударных Волн (МУВ), зарегистрированных прибором БМСВ (быстрый монитор солнечного ветра), установленным на спутнике СПЕКТР-Р. Высокое временное разрешение спектрометра (0.031 с для вектора потока и 1.5 с - для скорости, температуры и концентрации) даёт возможность изучать внутреннюю структуру фронта МУВ.

Для 21 события были вычислены параметры дважды ионизированного гелия (He^{++} или α -частицы) - концентрация (абсолютное и относительное содержание в плазме солнечного ветра), скорость, температура. Показано, что скорость He^{++} несколько меньше скорости протонов, относительная концентрация He^{++} редко превышает 10%, температура He^{++} примерно в 2 раза выше температуры протонов. На фронте МУВ в нескольких событиях были выявлены кратковременные и амплитудные скачки относительной концентрации He^{++} .

Выявлена тенденция к увеличению содержания He^{++} за фронтом МУВ (как абсолютного, так и относительного значений) в потоке плазмы солнечного ветра с увеличением угла $Q_{\text{Вп}}$.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-12-10062.

10 ЛЕТ ИЗМЕРЕНИЙ ПОТОКОВ МЕЖЗВЕЗДНЫХ АТОМОВ ВОДОРОДА НА АППАРАТЕ IBEX: НЕРЕШЕННЫЕ ВОПРОСЫ И БУДУЩИЕ ПЛАНЫ

Катушкина О.А., Измоденов В.В.

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

Работа посвящена анализу данных измерений потоков межзвездных атомов водорода, выполненных на аппарате Interstellar Boundary Explorer (IBEX) с 2009 по 2018 гг. Впервые на основании результатов численной модели были проанализированы временные вариации потоков межзвездных атомов водорода в течение солнечного цикла. Произведено параметрическое исследование и определено влияние широтной зависимости солнечного ветра, а также сила радиационного давления на измеряемые потоки атомов. Определено значение безразмерного параметра, характеризующего отношение силы радиационного отталкивания к силе гравитационного притяжения. Показано, что полученная сила радиационного давления необходимая для объяснения данных IBEX отличается от имеющихся данных измерений. Обсуждаются возможные причины полученных разногласий.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-32-20085.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИИ СКОРОСТЕЙ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ НА ЕЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНУТРИ ГЕЛИОСФЕРЫ

Гоценко Е.А., Измоденов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, eg24@yandex.ru

Гелиосфера движется относительно локальной межзвездной среды, в которой наряду с плазменной и нейтральной компонентами [1] присутствует также пылевая составляющая. Из-за относительного движения происходит проникновение частиц межзвездной пыли в гелиосферу. На движение пылевых частиц в гелиосфере основное влияние оказывают три силы: сила Лоренца, сила гравитационного притяжения и сила радиационного отталкивания [2]. Цель данного исследования — исследование влияния дисперсии скоростей пылевых частиц, которая возникает в межзвездной среде вследствие турбулентности, на распределение частиц межзвездной пыли в гелиосфере.

Для описания движения межзвездной пыли используется кинетический подход, который состоит в решении кинетического уравнения для функции распределения по скоростям. В качестве граничного условия рассматриваются различные комбинации дельта-функции и максвелловского распределения, параметры которого зависят от взаимодействия межзвездной пыли с межзвездным магнитным полем. Решение кинетического уравнения проводится методом Монте-Карло. При отсутствии дисперсии в граничной функции распределения частиц межзвездной пыли возможно появление сингулярных особенностей в распределении концентрации межзвездной пыли. Местоположение этих особенностей совпадает с результатами, полученными при моделировании той же задачи методом Осипцова-Лагранжа [2]. Вычисления, проведенные для максвелловской функции распределения пылевых частиц по скоростям, показывают, что эти особенности исчезают, оставляя лишь несингулярные области повышенной концентрации.

[1] Izmodenov, V.V., Alexashov, D.B. 2015 *Astrophys. J. Suppl.* V.220, 32

[2] Mishchenko, A.V., Godenko, E.A., Izmodenov, V.V., 2019, *MNRAS*, 491, 2020

ПОИСК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ РАССЕЯННОГО ЛАЙМАН-АЛЬФА ИЗЛУЧЕНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ НА КА SWAN/SOHO.

Волосатых А.С.^{1,2}, Измоденов В.В.^{1,2}, Катушкина О.А.²

¹ МГУ им. М.В.Ломоносова, volosatych.as14@physics.msu.ru

² ИКИ РАН

Солнечные Лайман-альфа фотоны рассеиваются на нейтральных атомах водорода, проникающих в гелиосферу из межзвездного пространства. Ранее 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 излучение, регистрируемое различными космическими аппаратами. В данном случае нейтральные атомы водорода выступают своеобразным экраном, на который проецируются, помимо регулярного излучения, и активные области. Это дополнительное излучение можно обнаружить на полных картах неба в интенсивности рассеянного Лайман-альфа излучения даже в том случае, если активная область 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. Представлены результаты моделирования полных карт рассеянного Лайман-альфа излучения в присутствии активной области с различными параметрами модели. Предлагается основанный на модели метод решения обратной задачи по данным интенсивностей рассеянного Лайман-альфа излучения, полученным прибором SWAN на космическом аппарате SOHO. С использованием данного метода проведен анализ данных SOHO/SWAN и получены оценки параметров активной области в рассматриваемые даты.

ГЕЛИОСФЕРНЫЕ ЭНЕРГИЧНЫЕ НЕЙТРАЛЬНЫЕ АТОМЫ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ С ДАННЫМИ IBEX- HI

Балиюкин И.И.^{1,2}, Измоленов В.В.^{1,2,3}, Алексахов Д.Б.^{1,3}

¹Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, igor.baliukin@gmail.com

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

³Институт проблем механики имени А.Ю. Иилинского РАН, г. Москва, Россия

Космический аппарат (КА) *Interstellar Boundary Explorer* (IBEX) с 2008 г. проводит измерения потоков энергичных нейтральных атомов (ЭНА) водорода на орбите Земли при помощи инструмента IBEX-Hi в диапазоне энергий от 0.3 до 6 кэВ. Нами была разработана численная модель для вычисления потоков ЭНА, в рамках которой восстанавливаются траектории движения атомов водорода (назад по времени) от точки пространства, где они регистрируются КА IBEX, до точки их рождения во внутреннем ударном слое (в области возмущенного солнечного ветра между внутренней ударной волной и гелиопаузой), где плазма сильно нагрета ($T \sim 10^6$ K). Вдоль траектории атома вычисляются и интегрируются потоки рожденных ЭНА, имеющих заданную скорость, а также учитываются потери частиц за счет процессов ионизации (перезарядки на протонах и фотоионизации).

Определяющим фактором при моделировании является детальный учет над-термальной компоненты захваченных протонов, рожденных в области сверхзвукового солнечного ветра и захваченных гелиосферным магнитным полем, так как эта компонента является «родительской» по отношению к ЭНА. Нами была учтена над-термальная компонента путем решения для нее кинетического уравнения в предположении изотропности функции распределения всюду в гелиосфере. Такой метод выгодно отличается от других существующих подходов (см. Zirnstein et al., 2017; Kornbleuth et al., 2018), так как основан на фундаментальных физических законах.

Были выполнены расчеты модельных карт потоков ЭНА на основе разработанных ранее кинетико-МГД моделей взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой (Izmodenov & Alexashov, 2015, 2020), и проведено сравнение с данными IBEX-Hi (Schwadron et al., 2014). Данные IBEX-Hi являются одним из немногих источников знаний о структуре границы гелиосферы, накладывая на параметры модели гелиосферы существенные ограничения, которые никогда ранее не учитывались. В результате сравнения мы заключили, что 1) потоки ЭНА из области внутреннего ударного слоя крайне чувствительны к виду функции распределения захваченных протонов; 2) модель гелиосферы (Izmodenov & Alexashov, 2020), отличающаяся от модели (Izmodenov & Alexashov, 2015) конфигурацией межзвездного магнитного поля, лучшим образом воспроизводит данные IBEX-Hi; 3) несмотря на относительно хорошее совпадение, на некоторых энергетических каналах наблюдаются качественные различия между результатами расчетов и данными IBEX-Hi. Обсуждаются причины этих различий.

Работа выполнена в рамках гранта фонда «Базис» № 18-1-1-22-1.

1. Zirnstein E. J., Heerikhuisen J., Zank G.P. et al. // *ApJ* 2017. V. **836**. P. 238
2. Kornbleuth M., Opher M., Michael A.T., Drake J.F. // *ApJ* 2018. V. **865**. P. 84
3. Izmodenov V.V., Alexashov D.B. // *ApJSS* 2015. V. **220**, P. 32
4. Izmodenov V.V., Alexashov D.B. // *A&A* 2020. (accepted)
5. Schwadron N.A., Moebius E., Fuselier S.A. et al. // *ApJSS* 2014. V. **215** P.13

Анализ фаз квазидвухлетних вариаций потоков космических лучей, параметров солнечной активности и межпланетной среды

Охлопков В.П.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ovpetrovich@yandex.ru

Исследованы фазы квазидвухлетних вариаций (КДВ) в потоках космических лучей, параметрах солнечной активности и межпланетной среды. Проведен спектральный анализ КДВ перечисленных данных. Выявлены спектральные составляющие для каждого параметра с максимальной амплитудой (синусоидальная составляющая эталонная с периодом около 1.7 года - 20.5 месяцев). Проведено сравнение фаз этих синусоид с фазами КДВ параметров в те временные интервалы, где КДВ однозначно выявлены достоверно. Показано, что по всем параметрам фазы квазидвухлетних вариаций сохраняются в течение многих десятилетий с незначительными отклонениями. Это свидетельствует о долготной стабильности областей на Солнце, ответственных за квазидвухлетнюю вариацию.

Таблица. Фазовые сдвиги между квазидвухлетними волнами различных параметров и эталонной спектральной составляющей (месяцы)

Параметр	Среднее значение сдвига	Среднеквадратичная ошибка среднего	Среднеквадратичная ошибка
Мурманск, стратосфера (КЛ)	2.45	.42	3.07
Нейтронный монитор, Троицк	1.74	.36	2.31
Ар-индекс	2.02	.42	2.70
Модуль среднего магнитного поля Солнца	2.05	.40	2.58
Межпланетное магнитное поле	2.65	.53	3.33
Угол наклона гелиосферного токового слоя	2.83	.53	3.37

1. Охлопков В. П. // Космические Исследования. 2018. Т. 56. № 2. С. 111.
2. Охлопков В. П. // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018. № 2, С. 100.
3. Okhlopkov V.P. // Cosmic Research (English translation of Kosimicheskije Issledovaniya), Maik Nauka/Interperiodica Publishing (Russian Federation), V. 56. № 2. P. 101.
4. Okhlopkov V.P. // Moscow University Physics Bulletin, Allerton Press (New York, N.Y., United States), V. 73. № 2. P. 223.

ВЕРОЯТНОЕ ВЛИЯНИЕ ГКЛ НА СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗЕМЛИ

Булатова Н.П.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, n.p.bulatova@mail.ru

При исследовании пространственно-временных факторов, влияющих на подготовку и возникновение сильных (с магнитудой $M \geq 7,0$) землетрясений, был сделан вывод: влияние на глобальную сейсмичность наряду с эндогенными (внутренними) источниками оказывают экзогенные (космические) источники, гравитационных, магнитных и др. полей. При сравнении временных рядов землетрясений с циклическими изменениями их свойств, например, солнечной активности (СА), был установлен факт антикорреляции количеств сильных землетрясений с фазами минимумов солнечной активности [1,2].

Предварительный анализ показал всю сложность и масштаб поставленной задачи. Очевидно, решать ее необходимо по частям, начиная с цикличности изменения магнитных полей Солнца (МПС). Это единственный параметр, который увеличивается при уменьшении СА.

Особый интерес в этом плане представляют работы Крайнева с сотр. [3], которые в течении длительного времени (1970-2018 гг.) проводят исследования в области наблюдения СА. Необычное поведение солнечной гелиосферы приводит к тому, что по мере уменьшения величин максимумов циклов СА (с 21 цикла по 24,5) в том же временном интервале происходит одновременное повышение интенсивности галактических лучей (ГКЛ) в фазе минимума СА. Динамика изменений позволяет предположить вероятное влияние ГКЛ на сейсмичность Земли. В ФИАНе с 1957 г. проводятся эксперименты регулярного баллонного мониторинга космических лучей в атмосфере Земли. Эти наблюдения, представлены авторами в серии работ, например [4]. Эти данные могут использоваться в космических исследованиях.

Можно было бы также рассмотреть идею со вспышками на Солнце, но их возникновение носит хаотический характер.

Автор данной работы планирует проверить вероятное влияние увеличения ГКЛ на глобальную сейсмичность Земли.

1. Булатова Н.П./ Диссерт. на степень физ.-мат. наук. 2004 г., ИФЗ РАН. Москва. 112с.
2. Bulatova N.P. / Interdiscipl. Sympos. on Complex Systems (ISCS 2013). Springer. Berlin. 2013. С. 237-244
3. Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Калинин М.С. и др// Геомагн. и аэрон. 2018. Т.58. №2. С.117.
4. Крайнев М.Б., Базилевская Г.А., Гвоздевский Б.Б. // Physics of Auroral Phenomena. 2018. Т. 41. № 1. С. 46-49.

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАЗМЫ В МАГНИТОСЛОЕ ЗЕМЛИ

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

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

Спутниковые измерения, проводимые последние полвека, показывают, что турбулентность является характерной чертой плазмы солнечного ветра. Исследование турбулентного каскада на масштабах порядка гирорадиуса протона и меньших (т.н. кинетические масштабы) с помощью непосредственных измерений на космических аппаратах представляет интерес для понимания процессов диссипации энергии и нагрева в бесстолкновительной плазме. Околоземная ударная волна, образующаяся при обтекании солнечным ветром магнитосферы Земли, может существенным образом видоизменять турбулентный каскад при движении потока плазмы к Земле. Отличие формы турбулентного каскада, наблюдаемого за околоземной ударной волной (в магнитослое), от типичной формы, наблюдаемой в невозмущенном солнечном ветре, было продемонстрировано неоднократно с помощью измерений магнитного поля. Аналогичные исследования для характеристик параметров плазмы были представлены только в последние годы, как статистически на основе измерений спутника Спектр-Р, так и для отдельных событий по данным миссии MMS. В частности, было показано, что околоземная ударная волна оказывает различное влияние на характеристики турбулентности солнечного ветра, относящегося к различным крупномасштабным типам. В настоящей работе на основе статистики рассматривается, как параметры и динамика характеристик солнечного ветра влияют на турбулентность плазмы за околоземной ударной волной. Используются данные прибора БМСВ на космическом аппарате Спектр-Р, которые позволяют рассматривать спектр флуктуаций потока ионов в диапазоне частот 0.01-10 Гц, что соответствует переходу от масштабов, на которых течение плазмы может быть описано в рамках магнитной гидродинамики, к кинетическим масштабам. Анализируется несколько сотен спектров флуктуаций потока ионов, полученных в области непосредственно за околоземной ударной волной. Для каждого события определяются параметры набегающего потока солнечного ветра в точке L1 на основе данных спутника WIND, такие как амплитуда и вариабельность потока и магнитного поля, температура и скорость плазмы, мощность флуктуаций параметров и др. Рассматривается зависимость параметров спектров за ударной волной, таких как форма спектра, мощность и наклоны на МГД и кинетических масштабах, от вышеуказанных параметров солнечного ветра. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 19-02-00177а.

ВЛИЯНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА РАДИОИЗЛУЧЕНИЕ УДАЛЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Афанасьев Н.Т., Лукьянцев Д.С.

ИГУ, г. Иркутск, Россия, spacemaklay@gmail.com

Как известно [1], при интерпретации данных наземных и орбитальных наблюдений характеристик радиоизлучения космических источников необходимо учитывать эффекты воздействия околосолнечной плазмы.

В работе [2] рассмотрена задача распространения собственного декаметрового радиоизлучения Солнца в условиях коронального выброса массы (КВМ). На основе кусочно-линейной аппроксимации траектории луча показана возможность наземных наблюдений залимбовых солнечных радиовсплесков вследствие влияния возмущенной области короны с пониженной электронной концентрацией, характеризующей КВМ.

В настоящей работе на основе аналитического и численного моделирования проведено исследование распространения залимбового радиоизлучения удаленных (внешних по отношению к Солнцу) космических источников в присутствии КВМ. Рассмотрены особенности траекторий радиоизлучения в зависимости от параметров КВМ и координат радиоисточников. Определены условия сильного воздействия КВМ на характеристики траекторий. Показана возможность наземных наблюдений внешнего залимбового радиоизлучения в присутствии КВМ.

Для расчета воздействия КВМ на характеристики радиоизлучения использована система лучевых дифференциальных уравнений. В качестве примера на рис. 1 представлены результаты расчетов траекторий радиоизлучения внешнего, по отношению к Солнцу, космического источника в отсутствии и при наличии КВМ. Нетрудно заметить, что при появлении на пути распространения радиоизлучения крупномасштабного возмущения обедненной концентрации, возможно образование плазменного волновода, в котором общий путь распространения значительно возрастает за счет последовательных отражений радиоизлучения от стенок волновода. Эти условия способствуют проникновению радиоизлучения на дальние расстояния и в конечном итоге позволяют ему попасть в точку приемника, находящегося на Земле.

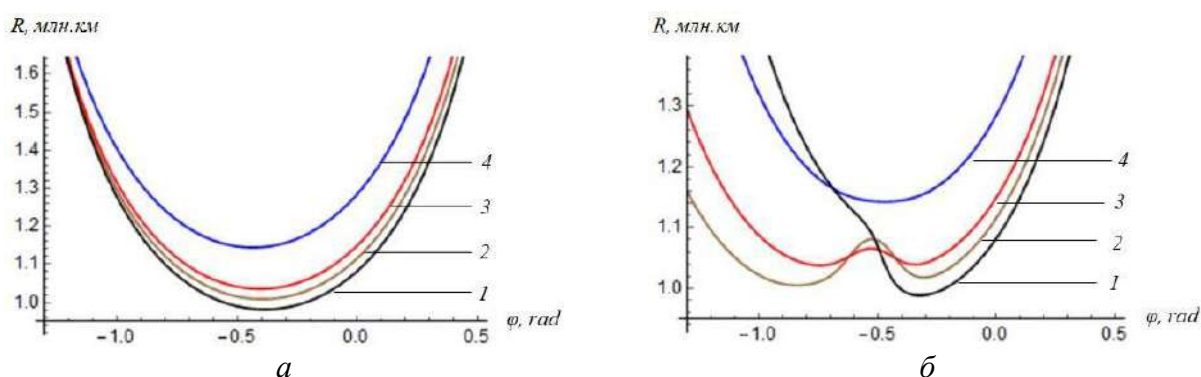


Рис.1. Траектории радиоизлучения космического источника с различными начальными углами падения на солнечную корону в отсутствии (а) и при наличии (б) КВМ.

1 - 0.0058 rad, 2 - 0.006 rad, 3 - 0.0062 rad, 4 - 0.007 rad. Рабочая частота $f=2.31$ GHz ($\lambda=13$ см).

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (гос.задание №3.9678.2017/БЧ)

1. Ефимов А.И., Рудаш В.К. // Зарубежная радиоэлектроника.- 2002. №9. С.28.
2. Станиславский А.А. // Радиофизика и радиоастрономия.- 2016. Т. 21, № 1. С. 3.

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ $\text{Ly}\alpha$ ИЗЛУЧЕНИЯ РОДИТЕЛЬСКОЙ ЗВЕЗДЫ НА СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ $\text{H}\alpha$ АТМОСФЕР ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ

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

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

Представлены результаты численного моделирования резонансного рассеяния звездных $\text{Ly}\alpha$ фотонов на атомах водорода в атмосферах горячих юпитеров HD189733b и HD209458b. Моделирование производилось методом Монте-Карло (Monte Carlo radiation transport) в трехмерной геометрии, при этом задача рассматривалась в динамике. В качестве исходных данных задавались распределения температуры и объемной плотности атомов водорода в атмосферах планет, полученный путем гидродинамического моделирования [1,2]. Профиль линии излучения $\text{Ly}\alpha$ брался из работы [3].

На основе разработанной модели были получены распределения объемной плотности возбужденных на второй уровень атомов водорода для атмосфер экзопланет HD189733b и HD209458b. С использованием полученных распределений были вычислены $\text{H}\alpha$ спектры поглощения/пропускания, которые изображены на рисунке 1. Результаты, полученные для планеты HD189733b сравнивались с наблюдательными данными, а также с вычислениями других авторов, при этом было получено хорошее соответствие.

HD189733b. Поглощение в центре линии порядка $\sim 2\%$, что согласуется с численными результатами других авторов и наблюдениями [4]. При этом поглощение происходит в слое ~ 1.5 -2 радиусов планеты. В поглощающем слое концентрация возбужденных на второй уровень меняется в пределах от 10^4 до 10^2 см^{-3} , что также согласуется с оценками других авторов [5].

HD209458b. Поглощение в центре линии порядка $\sim 1\%$. При этом поглощение происходит в слое ~ 1.5 радиусов планеты. В поглощающем слое концентрация возбужденных на второй уровень меняется в пределах от 10^4 до 10^2 см^{-3} .

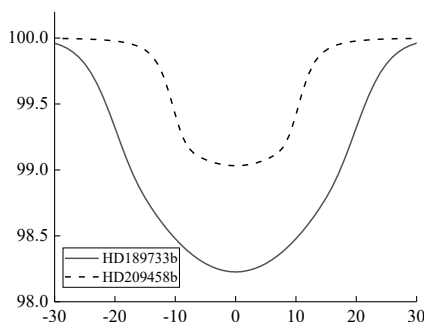


Рисунок 1. Спектры пропускания планет HD189733b и HD209458b

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 18-12-00080, проекта РФФИ 20-02-00520 и государственного задания Минобрнауки РФ (№ АААА-А17-117021750017-0). 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 $\text{Ly}\alpha$ //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.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ОБЛАСТИ ПОВЫШЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СВЕРХКОРОНЫ СОЛНЦА МЕТОДОМ РАДИОЗОНДИРОВАНИЯ СИГНАЛАМИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ *VENUS EXPRESS* И *MARS EXPRESS*

Ефимов А.И., Луканина Л.А., Смирнов В.М., Чашей И.В., Бёрд М.К., Петцольд М.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, efimov@ms.ire.rssi.ru

В период с 6 октября по 6 декабря (DOY 279-340) 2006 г. в наземных пунктах сети слежения за космическими аппаратами (КА), расположенными в г. Голдстоун и Мадрид, были выполнены эксперименты по радиозондированию околосолнечной плазмы сигналами КА *Venus Express* (VEX) и *Mars Express* (MEX). Особенность этих экспериментов состоит в том, что движение лучевой линии VEX–Земля происходит с запада (DOY 281-299) на восток (DOY 300-340) в то время как радиолиния MEX–Земля перемещается с восточной стороны (DOY 279-298) на западную (DOY 300-326). Наибольшее приближение лучевой линии к Солнцу составляло 3.2 радиуса Солнца R_s , максимальное удаление радиолуча от центра Солнца достигало 36 R_s .

Первое наблюдение повышенных флуктуаций частоты зондирующих солнечную корону радиосигналов было зарегистрировано 6 октября 2006 г. (DOY 279), когда сигналами КА *Mars Express* зондировались восточные по отношению к центру Солнца области при удалении лучевой линии около 20 R_s .

Спустя 13-14 дней (половина периода вращения Солнца $T_0=27$ суток), с 20 на 21 октября (DOY 293-294), корональный источник области повышенной турбулентности располагался на западном лимбе Солнца, а возмущенный поток плазмы вызвал усиление частотных флуктуаций сигналов КА *Venus Express* с максимумом при $t=294.0$ суток.

В дальнейшем область повышенной турбулентности переместилась на восточную сторону и еще примерно через 14 суток вызвала третье усиление флуктуаций частоты с максимумом около $t=308.02$ суток. Интервал между регистрациями первого и третьего максимумов флуктуаций частоты составил $\Delta t=308.03-279.7 \approx 28.33$ суток, что свидетельствует о связи высокого уровня флуктуаций частоты зондирующих плазму радиосигналов с одной и той же областью солнечной короны. Таким образом, повторяющиеся усиления флуктуаций частоты сигналов *Mars Express* и *Venus Express* могут быть объяснены прохождением через луч зрения сжатой части коротирующего возмущения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0030-2019-0008.

ДОЛГОВРЕМЕННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ СЕВЕРО-ЮЖНОЙ АНИЗОТРОПИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ПО ДАННЫМ СЕТИ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ

Янке В.Г., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia, yanke@izmiran.ru

Никакое исследование анизотропии космических лучей не может считаться полным и законченным без изучения северо-южной составляющей. Северо-южная анизотропия сильнее всех других составляющих анизотропии космических лучей связана с полярностью межпланетного магнитного поля. Это её выделяет делает ее изучение особенно необходимым и ценным. Знание временной зависимости компонент вектора анизотропии позволяет в рамках некоторых модельных предположений оценить временные изменения важных параметров межпланетной среды, в первую очередь, составляющих градиента космических лучей и коэффициентов диффузии.

Из-за малости эффекта выделение северо-южной анизотропии космических лучей очень чувствительно к качеству данных и к особенностям используемой методики. Не удивительно, что результаты различных работ существенно отличаются. Задача настоящей работы - максимально расширить исследуемый период и сравнить результаты применения различных методик.

Для выделения составляющих вектора анизотропии (суточной и северо-южной асимметрии) применялся метод глобальной съёмки с привлечение данных мировой сети нейтронных детекторов (~45). Данные тщательно верифицировались, чтобы исключить влияние различных аппаратных эффектов. Для независимого контроля результатов глобально-спектрографического метода в среднесуточном приближении привлекался простой метод пар приполярных станций, расположенных в противоположных полушариях. Величина северо-южной анизотропии зависит от выбора базового дня, который выбирался для каждого месяца, и относительно него вычислялись вариации северо-южной анизотропии, как в текущем, так и в следующем месяце. Разница среднесуточных значений северо-южной анизотропии, полученных для разных базовых дней (в текущем и предыдущем месяце) использовалась для сшивания результатов.

В полученных вариациях северо-южной анизотропии за 2002-2018 гг. наблюдается явно выраженная годовая волна, максимум которой, как правило, приходится на июль-август. В среднем разница минимальных и максимальных среднесуточных значений северо-южной анизотропии в году составляет 0.9%.

Выполнены оценки долговременных изменений градиентов космических лучей. Значения радиального градиента в течение эпох отрицательной солнечной магнитной полярности больше, чем в эпоху положительной полярности, в то время как широтный градиент меняет знак в соответствии с солнечной магнитной полярностью. Поведение обоих градиентов находится в соответствии с дрейфовой теорией космических лучей.

Работа выполнена в рамках программы президиума РАН №3 и 12. Анализ базируется на экспериментальных данных УНУ "СЕТЬ СКЛ".

Белов А.В., Дорман Л.И., Оленева В.А., "Определение северо-южной асимметрии космических лучей по данным наземных наблюдений" // Сб. «Космические лучи» (Москва, Наука), Vol. 25, pp. 5-22, 1988.

Munakata K., Kozai M., Kato C., Kota J., "Long-term variation of the solar diurnal anisotropy of galactic cosmic rays observed with the Nagoya multi-directional muon detector" // The Astrophysical Journal, 791:22 (16pp), 2014. [doi:10.1088/0004-637X/791/1/22](https://doi.org/10.1088/0004-637X/791/1/22).

ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ ОТ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА СООТВЕТСТВУЮЩИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В., Черток И.М., Гайдаш С.П., Прямушкина И.И., Шлык Н.С.

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

В последние годы было показано, что магнитный поток солнечных эрупций, рассчитанный по наблюдениям диммингов и постэруптивных аркад, тесно связан с величиной Форбуш-понижений и силой геомагнитных бурь, являющихся следствием этих эрупций. Поскольку в мощных спорадических событиях наблюдается комплекс взаимосвязанных явлений, включающий вместе с выбросами солнечного вещества эффективное ускорение, естественно ожидать связь магнитного потока эрупций и с величиной протонных возрастаний. В представляемой работе проверяется это предположение.

КОМПЛЕКС МИНИАТЮРНЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Шувалов С.Д., Шестаков А.Ю., Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Журавлев Р.Н.

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

Наш проект направлен на создание прототипа комплекса малогабаритного легкого научно-измерительного оборудования для диагностики корпускулярного излучения Солнца и космической среды, необходимого для мониторинга и прогнозирования эффектов космической погоды. В этот комплекс оборудования войдет базовый набор приборов для диагностики солнечного корпускулярного излучения: (1) анализатор ионов солнечного ветра (0,5 – 10 кэВ); (2) анализатор электронов солнечного ветра (30 эВ – 10 кэВ); (3) телескоп солнечных энергичных частиц (электроны с энергиями $\sim 1 - 10$ МэВ, ионы $\sim 10 - 100$ МэВ/нуклон). Мы уделяем особое внимание оптимизации приборов с точки зрения массогабаритных характеристик, чувствительности, надежности, универсальности, возможности быстрой модификации. Мы полагаем, что этот комплект оборудования впоследствии может стать базовым для более крупных комплексов мониторинга солнечного корпускулярного и электромагнитного излучения, разрабатываемых в России. С небольшой модификацией оборудование может также использоваться на космических кораблях с орбитами внутри магнитосферы (для диагностики плазмы и энергетических частиц), с межпланетными орбитами, на внеземных базах (на Луне и Марсе). Представляем итоги второго года нашего проекта по двум приборам комплекса.

1. В течение второго года мы изготовили и успешно проверили рабочее состояние прототипа Плазменного Ионного Компактного Анализатора (ПИКА). В ходе предварительных испытаний на базе разработанного лабораторного комплекса [1] мы проверили работоспособность детектора и оценили разрешение энергии электростатического анализатора $\Delta E/E$, которое составило 10%, что соответствует параметрам модели [2].

2. Опытный образец Электронного Компактного Спектрометра (ЭКОС) изготовлен и прошел предварительные испытания. В ходе этих испытаний мы проверили работу координатно-чувствительного детектора и определили его характеристики. Пространственное разрешение детектора оценено в 11 линий, что позволит достичь требуемых аналитических характеристик прибора [3].

3. По телескопу солнечных энергичных частиц на конференции представлен отдельный доклад.

Работа выполнена при поддержке Гранта РНФ 17-72-20134.

1. Моисеенко Д.А., Вайсберг О.Л., Шестаков А.Ю., Журавлёв Р.Н., Шувалов С.Д., Митюрин М.В., Моисеев П.П., Нечушкин И.И., Родькин Е.И., Васильев А.Д., Летуновский В.В. // ПТЭ 2019 №3 с. 52-62
2. Шестаков А.Ю., Моисеенко Д.А., Шувалов С.Д., Вайсберг О.Л., Журавлёв Р.Н. // ПТЭ 2019 №6 с. 104-108
3. Шувалов С.Д., Шестаков А.Ю., Носов А.В., Митюрин М.В., Моисеенко Д.А., Журавлёв Р.Н. // ПТЭ 2020 №2 (подписана в печать 30.11.2019)

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ КОРОНАЛЬНЫЕ ДИММИНГИ КАК ИСТОЧНИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Горяев Ф.Ф., Слемзин В.А., Родькин Д.Г.

ФИАН РАН, г. Москва, Россия, goryaev_farid@mail.ru

В процессе образования и распространения корональных выбросов массы (КВМ) в солнечной короне образуются крупномасштабные области с пониженным излучением в ВУФ и мягком рентгеновском диапазонах спектра, известные как корональные димминги. Обычно это понижение яркости связывают с уходом значительной части плазмы вместе с КВМ. Изучение диммингов актуально как важная составляющая эволюции КВМ в короне, так и с точки зрения их связи с источниками солнечного ветра.

В настоящей работе рассматриваются несколько корональных диммингов, наблюдавшихся в период 2010-2017 г.г. на солнечном лимбе. Мы исследовали морфологию, эволюцию и плазменные характеристики надлимбовых диммингов, используя для этого данные приборов PROBA2/SWAP и SDO/AIA. С помощью разностных изображений телескопа SWAP в узкой полосе вблизи $174 \text{ \AA}$ наблюдаются яркие лучевые структуры, выходящие из центра эрупции и протягивающиеся в поле зрения SWAP до высот порядка $0.6R_{\text{sun}}$. Аналогичные структуры наблюдаются также коронографом SOHO/LASCO-C2 в основаниях магнитных жгутов, связанных с КВМ. Разностные изображения STEREO/EUVI демонстрируют источники этих структур на диске как расходящиеся лучи, которые оказываются ярче в канале $171 \text{ \AA}$, чем в $193 \text{ \AA}$. Это может означать, что эти структуры имеют температуры порядка и ниже 2 MK .

Для исследования температурного состава диммингов мы использовали метод дифференциальной меры эмиссии (ДЭМ), основанный на использовании ВУФ данных AIA. ДЭМ анализ показал, что мера эмиссии в лучевых структурах для температур $0.5\text{-}1.3 \text{ MK}$ возрастала до 50% по сравнению с до-эруптивной фазой, тогда как для окружающей плазмы с температурой $1.3\text{-}3.5 \text{ MK}$ мера эмиссии понижалась на 20-40%. Для события 18 Августа 2010 г. измерения параметров плазмы солнечного ветра с помощью инструмента STEREO/PLASTIC показывают признаки холодных потоков в хвосте КВМ с ионным составом $\text{Fe}^{8+} - \text{Fe}^{10+}$, соответствующим измеренной температуре в пост-эруптивных ярких лучевых структурах в солнечной короне.

МОДУЛЯЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 23-24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И СРАВНЕНИЕ С 21-22 ЦИКЛАМИ

Янке В. Г., Белов А. В., Гущина Р. Т.

ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия, yanke@izmiran.ru

Значительный тренд магнитного поля Солнца, начало которого отмечено при переходе от 22-го цикла к 23-му, продолжался в 23-м и наблюдается в 24-м цикле до настоящего времени. Ослабление солнечного магнитного поля через солнечный ветер распространяется и на гелиомагнитосферу. Основные характеристики солнечного магнитного поля и связанного с ним межпланетного магнитного поля, имеют определяющее значение для модуляции космических лучей (КЛ), создавая отличия вариаций КЛ в циклах СА. Долгопериодные вариации КЛ в 23-24 циклах СА и их сравнение с вариациями в предыдущих циклах (21-22-ом), позволяет выявить новые, не наблюдавшиеся до последних двух десятилетий, особенности модуляции КЛ. В последние два цикла СА модуляция КЛ оказалась самой слабой за время работы нейтронных мониторов.

В разработанной нами модели модуляции учтено воздействие полярного магнитного поля Солнца (H_{pol}), среднего крупномасштабного поля Солнца (B_{ss}), наклона нейтрального слоя ($hcst$), влияние площади корональных дыр (A_{I3}) и спорадической активности Солнца (индекс CME). Модельные расчеты модуляции для анализируемых двух временных интервалов (21-22 и 23-24 циклов СА) показали: при небольшом отличии полученных регрессионных характеристик (и времен запаздывания вариаций КЛ относительно индексов СА) картина распределения вкладов в создаваемую модуляцию КЛ от воздействия вышеуказанных индексов СА сильно различается.

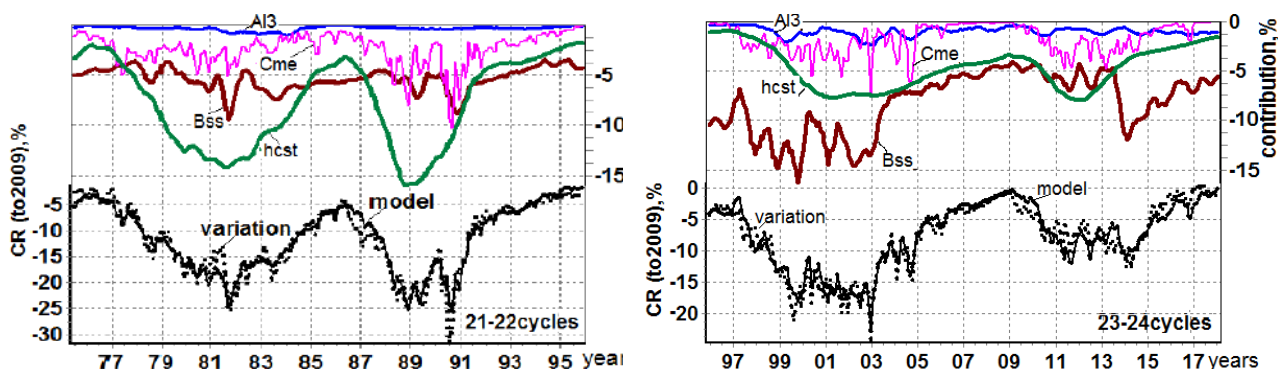


Рис. 1. Вклад в модуляцию КЛ от изменений характеристик СА в 21-22 и 23-24 циклах.

Определяющая роль в создании модуляции 21-22 циклах принадлежит $hcst$, а в двух последних циклах - среднему магнитному полю Солнца B_{ss} (рис.). В 23-24-ом циклах выявлено уменьшение влияния $hcst$ на модуляцию КЛ: при том что изменение величины наклона $hcst$ происходит в тех же пределах, что и в других циклах, эффективность её воздействия на модуляцию сильно снижена. Коэффициент регрессии для $hcst$ в модели 23-24-го цикла - $0.09\%/^{\circ}$. Это в 2 раза меньше, чем в 21-22 циклах ($-0.18\%/^{\circ}$). Воздействие на КЛ крупномасштабного магнитного поля Солнца (B_{ss}), несмотря на снижение величины B_{ss} , в 23-24-ом циклах преобладает во вкладе в модуляцию КЛ (для 23-24 цикла $-1.87\%/mT$, а для 21-22-цикла $-0.76\%/mT$). Модуляция КЛ в 2018 г. еще не достигла минимального значения. Солнце находится в положительной фазе 22-летнего магнитного цикла и предстоящий максимум потока КЛ ожидается продолжительным (подобно 1974-1976 гг. и 1994-1997 гг.). В 24-ом цикле СА, малая глубина модуляции хорошо согласуется с аномально низкой СА.

Работа выполнена в рамках программ президиума РАН №3 и №12. Работа базируется на экспериментальных данных УНУ "СЕТЬ СКЛ".

ОДИНОЧНЫЕ И КОМПЛЕКСНЫЕ ТРАНЗИЕНТНЫЕ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ИХ ГЕОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Родькин Д.Г., Слемзин В.А.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, rodkindg@gmail.com

Спорадические транзистентные структуры солнечного ветра (СВ), называемые также межпланетными корональными выбросами массы (МКВМ), фиксируются у Земли в точке Лагранжа L1 и являются проявлениями наблюдаемых в короне Солнца корональных выбросов массы (КВМ).

Известно, что МКВМ обладают высокой геоэффективностью, в большинстве случаев приводя к возникновению умеренных и сильных геомагнитных возмущений. В работе Ю.И. Ермолаева и сотрудников [1] были проведены детальные исследования геоэффективности различных типов течений СВ (области сжатия перед высокоскоростными потоками (“CIR”), МКВМ типа магнитного облака и “эжекта”, области уплотнений плазмы перед МКВМ), и было показано, что МКВМ типа магнитного облака наиболее геоэффективны. Однако, до сих пор при анализе МКВМ и оценках их геоэффективности не учитывалось образование комплексных структур при взаимодействии потоков в гелиосфере.

В нашей работе рассмотрена геоэффективность крупномасштабных комплексных транзистентных структур СВ в период с января 2010 г. по август 2011 г., образованных при взаимодействиях КВМ с высокоскоростными потоками (ВСП) из корональных дыр или с другими КВМ в гелиосфере, в сравнении с одиночными МКВМ. Разделение потоков СВ на одиночные и комплексные структуры было проведено на основе анализа ионного состава СВ и типов солнечных источников [2]. Всего было определено 11 одиночных и 12 комплексных структур (структуры, образованные последовательно приходящими друг за другом КВМ; структуры, образованные взаимодействием быстрого КВМ с медленным; и структуры, образованные взаимодействием КВМ с ВСП), отличающиеся общей длительностью, средней магнитудой магнитного поля и ионным составом. Геоэффективность структур оценивалась по индексам Dst, ap и AE. Показано, что комплексные структуры СВ, образованные в результате взаимодействия КВМ с высокоскоростными потоками из корональных дыр или с другими КВМ в гелиосфере, чаще приводят к умеренным и сильным, с $Dst < -60$ нТл, геомагнитным бурям (86% случаев) по сравнению с одиночными КВМ (17%). Получены значения коэффициентов корреляции между $|Dst|$ и параметрами плазмы $v \cdot B_s$ (максимальное значение произведения скорости СВ на южную компоненту межпланетного магнитного поля (ММП) за время транзистента) и B_s (максимальное значение южной компоненты ММП за время транзистента): 0.76 и 0.53 для одиночных структур и 0.91 и 0.91 для комплексных; между ap и $v \cdot B_s$, B_s : 0.67 и 0.4 для одиночных структур и 0.93 и 0.8 для комплексных; между AE и $v \cdot B_s$, B_s : 0.82 и 0.62 для одиночных структур и 0.8 и 0.77 для комплексных. Таким образом, определяющим параметром при рассмотрении геоэффективности как одиночных [3], так и комплексных структур является произведение $v \cdot B_s$.

1. Yermolaev Y.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Y. // J. Geophys. Res. 2012. V. **117**. A00L07.
2. Rodkin D., Slemzin V., Zhukov A.N., Goryaev F., Shugay Yu., Veselovsky I. // Solar Phys. 2018. V. **293**. P. 78.
3. Wu C.-C., Lepping R.P. // J. Geophys. Res. 2002. V. **107**. A10. P. 1314.

РАСШИРЕННЫЙ КАТАЛОГ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ЯВЛЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ЗА ПЕРИОД 21-24 СОЛНЕЧНЫХ ЦИКЛОВ (1976 – 2018 ГОДЫ)

Лодкина И.Г., Ермолаев Ю.И., Хохлачев А.А., Ермолаев М.Ю., Дремухина Л.А., Москалева А.В.

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

В работе представлены предварительные результаты обновления и анализа расширенного каталога крупномасштабных явлений солнечного ветра (СВ) за период 1976-2018гг. на основе измерений в базе данных OMNI2 (см. сайт <ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/> и статью [1]). 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 (SHE_{MC} и SHE_{EJ}, соответственно), предшествующие им, а также межпланетная ударная волна (IS). Временной период с 1976 по 2018гг содержит 4 полноценных солнечных циклов (СЦ), что позволяет в полном объеме провести сравнение поведения параметров на различных СЦ. Полученные результаты подтверждают, что (1) количество возмущенных типов СВ и (2) средние значения анализируемых параметров СВ в 24-м цикле меньше, чем в предыдущих циклах.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 16-12-10062.

[1] Ю.И. Ермолаев, Н.С. Николаева, И.Г. Лодкина, М.Ю. Ермолаев (2009), Каталог крупномасштабных солнечных ветровых явлений в 1976-2000 гг., Космические исследования, т. 47, № 2, стр. 81-94

СПЕКТРОМЕТР АРИЕС-Л ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПОВЕРХНОСТЬЮ ЛУНЫ

Моисеенко Д.А.¹, Вайсберг О.Л.¹, Шестаков А.Ю.¹, Журавлев Р.Н.¹, Шувалов С.Д.¹,
Митюрин М.В.², Моисеев П.П.², Нечушкин И.В.², Летуновский В.В.²

1) ИКИ РАН, г. Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru

2) ООО «НПП «Астрон-Электроника», г. Орел, Россия, astronel-moiseev.pp@yandex.ru

Изучение процессов взаимодействия солнечного ветра с реголитом на поверхности Луны, исследование характеристик вторичных и отраженных ионов и нейтральных частиц является актуальной научной задачей в рамках развития лунной космической программы. Для решения этой задачи создан ионный энерго-масс анализатор АРИЕС-Л с широким полем зрения и функцией регистрации потока нейтральных частиц.

АРИЕС-Л – широкоугольный энерго-масс анализатор, разработанный в рамках космической миссии Луна-25. В ходе выполнения космического эксперимента прибор позволит провести элементный состав реголита в области посадки методами вторичной ионной масс-спектрометрии, исследовать процессы взаимодействия солнечного ветра с реголитом, провести измерения потоков нейтральных атомов.

Сочетая комбинацию электростатического и времяпролетного элементов электронной оптики, прибор позволяет проводить анализ заряженных частиц по соотношению энергии к заряду E/Q и выполнять массовый анализ потока частиц в диапазоне энергий от 10 эВ до 5000 эВ. Отличительной особенностью прибора является возможность одномоментной регистрации частиц выбранной энергии в поле зрения, близком к 2π . Принцип действия конвертера нейтральных частиц основан на ионизации нейтральных атомов при их взаимодействии с поверхностью электрода-ионизатора.

Выполненные работы по лабораторным настройкам и калибровкам позволили достичь требуемых от прибора аналитических характеристик: обеспечить поля зрения, близкие к 2π с достаточно высоким для приборов такого типа угловым разрешением: 40° по азимутальному углу и не хуже 30° по полярному, энергетическое разрешение не хуже 13% и массовое разрешение не менее 30.

Прибор прошел полный цикл испытаний, подтверждающих его готовность к работе на космическом аппарате. Выполнены работы по планированию научных измерений в составе космического аппарата на поверхности Луны, функционирование прибора по циклограммам запланированных измерений проверено в вакуумной камере.

Проведенные подробные исследования аналитических характеристик прибора АРИЕС-Л позволят с высокой достоверностью проводить интерпретацию научных данных, получаемых в ходе выполнения космического эксперимента на аппарате Луна-25, целью которого является проведение изучения элементного состава реголита в области посадки методами вторичной ионной масс-спектрометрии, исследование процессов взаимодействия солнечного ветра с реголитом, измерения потоков нейтральных атомов.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ КРУПНОМАСШТАБНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА И ВРЕМЕННЫХ ВАРИАЦИЙ СОЛНЕЧНОЙ И ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

Громов С.В.¹, Загайнова Ю.С.¹, Файнштейн В.Г.², Вальчук Т.Е.¹, Громова Л.И.¹

¹ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия; sgromov@izmiran.ru; ²ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

В данной работе в циклах солнечной активности (СА) с 21 по 24 исследовались циклические вариации характеристик крупномасштабного магнитного поля Солнца. В качестве параметров СА мы использовали числа Вольфа $W(t)$, длину $L(t)$ нейтральной линии (НЛ) [1], ее максимальное отклонение от плоскости солнечного экватора $D(t)$ и коэффициенты разложения потенциала поля по сферическим гармоникам [2]. Показано, что вариации как $L(t)$, так и коэффициентов сферического разложения потенциала поля, существенно отличаются от вариаций $W(t)$, а с другой стороны, вариации $D(t)$ хорошо с ними согласуются.

Фундаментальный характер данного исследования определяется тем, что эруптивные события рассматриваются как часть общих циклических процессов на Солнце. Изменение перечисленных параметров СА, а именно, $W(t)$, $L(t)$ и $D(t)$, мы сопоставили с циклическими вариациями появления корональных выбросов массы (КВМ) разного углового размера (с суммарным числом КВМ $N_{\text{СМЕ}}$, числом гало-КВМ $N_{\text{НСМЕ}}(t)$ и полугало-КВМ $N_{\text{РНСМЕ}}$ за каждый месяц наблюдений коронографов LASCO за 23 и 24 циклы СА [3]). Установлено, что временные изменения $N_{\text{СМЕ}}(t)$ и $W(t)$ близки на фазе роста и в максимуме 23 солнечного цикла и существенно различаются с середины спада СА. С другой стороны, заметная корреляция наблюдается между $N_{\text{СМЕ}}(t)$ и $L(t)/D(t)$ именно на фазе спада 23 цикла СА.

Известно, что важным направлением исследований СА является сопоставление изменений циклических вариаций различных характеристик магнитного поля Солнца с числом или параметрами геомагнитных бурь [4]. В рамках нашего исследования были сопоставлены вариации числа КВМ различного углового размера с геомагнитной активностью, характеризующейся числом зарегистрированных приходов к Земле межпланетных ударных волн, вызвавших внезапные импульсы в геомагнитном поле (SI) или внезапные начала геомагнитных бурь (SSC), т.е. $N_{\text{SI}}(t) + N_{\text{SSC}}(t)$, а также с суммарным числом крупномасштабных событий в солнечном ветре EJECTA (N_{EJ}) и MC (N_{MC}) [5]. Установлено, что в затянувшемся минимуме СА между 23 и 24 солнечными циклами число есть период, когда число зарегистрированных SSC и SI превышает число $N_{\text{НСМЕ}}$ и $N_{\text{РНСМЕ}}$. По результатам нашего исследования выдвинуто предположение, что в генерацию SSC и SI могут вносить вклад КВМ с малым угловым размером ($<180^\circ$). Результаты нашего исследования могут быть использованы для анализа и прогноза геоэффективности проявлений СА.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-02-00151.

1. Makarov V.I., Sivaraman K.M. Kodaikanal Obs. Bull., 1986, V.7, P. 2.
2. Makarov V.I., Tlatov A.G. Proc. SOHO 10/GONG Workshop-2000, Santa Cruz de Tenerife, Tenerife, Spain, 2-6 October 2000 (ESA SP-464, January 2001), 2000, P.111-114.
3. Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., et al. The SOHO/LASCO CME Catalog // Earth Moon Planet. 2009. V. 104. P. 295-313.
4. Обридко В.Н., Канониди Х.Д., Митрофанова Т.А., Шельтинг Б.Д. Геомагнетизм и аэрономия, 2013, Т.53, № 2, С. 157-166.
5. Ермалаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. // Космические исследования .47.№2. С.99-113. 2009

Численное 3D моделирование взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой на сетке Дирихле с выделением разрывов

Корольков С.Д., Алексашов Д.Б., Измоленов В.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия

При взаимодействии солнечного (звездного) ветра с локальной межзвездной средой образуется сложная газодинамическая структура с двумя ударными волнами (гелиосферной и внешней) и разделяющим их тангенциальным разрывом (гелиопаузой) [1]. Для адекватного анализа экспериментальных данных полученных на таких космических аппаратах, как Voyager 1 и 2, Interstellar Boundary Explorer (IBEX) и других требуется уметь рассчитывать газодинамическую структуру с большой степенью точности. Так, например, для положений гелиосферной ударной волны и гелиопаузы требуемая точность превышает один процент.

В докладе будет представлена новая численная модель расчета области взаимодействия. В этой модели использованы все преимущества модели [1] – подвижная сетка, позволяющая выделять разрывы, точное решение задачи о распаде разрыва на границах ячеек (метод Годунова), улучшение аппроксимации схемы с помощью TVD процедуры. Вместе с тем, новым в численной модели является построение неструктурированной расчетной сетки ячейками которой являются ячейки Дирихле. Для построения такой сетки используется диаграмма Вороного. Такие сетки имеют ряд преимуществ: возможность триангуляции любых геометрически сложных областей, движения сеток во время расчётов, выделение разрывов, регуляризация сетки — позволяющая, в зависимости от специфики задачи, распределять центры ячеек равномерно по всей области или сгущать ячейки в тех областях, где это необходимо.

В докладе будут представлены результаты расчетов и, в частности, исследована газодинамическая структура в тыловой части области взаимодействия, которая состоит из диска Маха, вторичного тангенциального разрыва, отраженной и преломленной ударных волн. Будут также обсуждаться вопросы устойчивости гелиопаузы.

[1] Izmodenov, V.V., Alexashov, D.B. 2015 *Astrophys. J. Suppl.* V.220, 32

НЕХАРАКТЕРНОЕ ПОНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В МАЕ 2019 ГОДА НА ФОНЕ МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Трефилова Л.А., Кобелев П.Г., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Мелкумян А.А., Оленева В.А., Янке В.Г.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia, trefilova@izmiran.ru

На фоне минимума 24го цикла солнечной активности, с небольшими вариациями космических лучей, в мае 2019 года на нейтронных мониторах наблюдалось понижение интенсивности космических лучей на ~4%, которое длилось около одного периода вращения Солнца (рис.1).

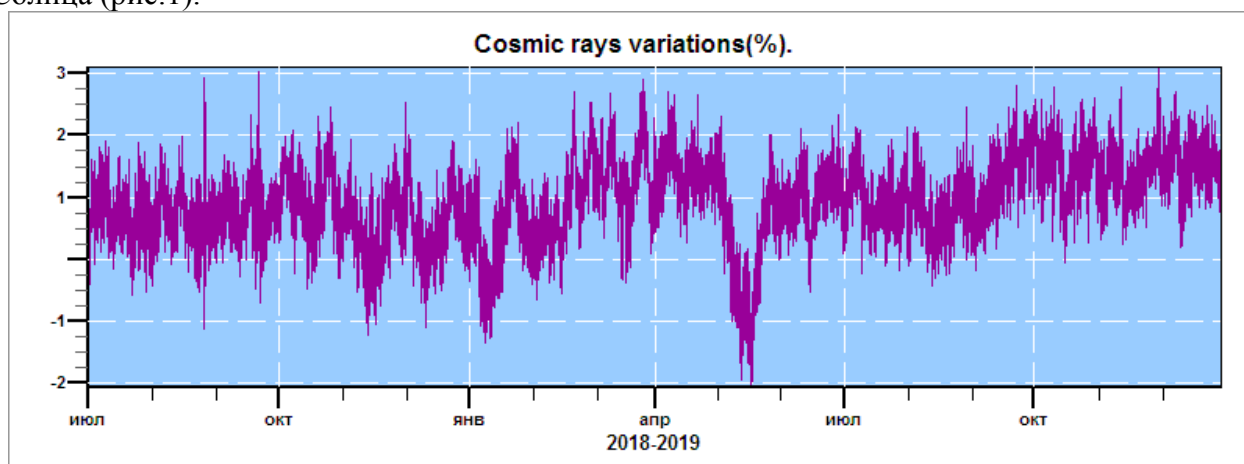


Рис. 1. Вариации скорости счета космических лучей в мае 2019 года на станции Москва.

Обращает на себя внимание долгое и пологое понижение, а также более продолжительное, в сравнении с обычно наблюдаемым восстановлением после Форбуш-эффектов, время восстановления. Схожее событие наблюдалось в августе-сентябре 1979 года [Белов и др., 1983], однако с большим понижением интенсивности космических лучей (более 10%). Также определённое сходство удалось найти и в другие периоды – апрель 1980, июль 2000 и июль 2006 с амплитудами 6%, 11% и 3,5% соответственно.

Анализ наблюдений Солнца в различных диапазонах УФЧ диапазона и на коронографе выявил серию последовательных выбросов солнечного вещества, так повлиявших на космические лучи, что результат можно принять за один Форбуш-эффекта. Серия началась 30 апреля с “обратного гало” СМЕ. Этот выброс не достиг Земли, но привел к понижению интенсивности космических лучей. Далее 3-4 и 7-8 мая наблюдались другие выбросы из той же активной области. Вечером 12 мая произошел выброс прямо из центральной зоны (на коронографе наблюдалось прямое гало). За период с 28 апреля по 12 мая зафиксировано 9 достаточно мощных выбросов из 22 наблюдавшихся в течение 1,5 лет, что составляет более 40%.

Гипотезу серии небольших событий, удачно следовавших друг за другом, подтверждает анализ, проведенный методом глобальной съемки и позволивший выделить отдельные события серии.

Работа выполнена в рамках программы президиума РАН №12 и 3. Работа базируется на экспериментальных данных УНУ “СЕТЬ СКЛ”.

Belov A.V., Dorman L.I., Eroshenko E.A., Melkumyan A.A., "Two great cosmic ray intensity decreases in August and September 1979" // «Cosmic Rays» (Moscow, NAUKA), Vol. 23, pp. 60-63, 1983.

МГД МОДЕЛИРОВАНИЕ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ АО 10365 В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ С ЦЕЛЬЮ ИЗУЧЕНИЯ ВСПЫШЕЧНОЙ СИТУАЦИИ

Подгорный А.И.¹, Подгорный И.М.², Борисенко А.В.¹

¹ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

Продолжено изучение физического механизма солнечной вспышки, с целью понять происходящий в солнечной короне процесс медленного накопления магнитной энергии, и ее последующего быстрого освобождения, а также, в дальнейшем, подробно изучить ускорение солнечных космических лучей индукционным магнитным полем во время вспышки. Изучение физики происходящих на Солнце взрывных процессов предполагается в дальнейшем использовать для улучшения прогноза солнечных вспышек и появления солнечных космических лучей. Благодаря применению суперкомпьютера удалось получить первые результаты моделирования в реальном масштабе времени в короне над активной областью АО 10365 в течение первых двух суток ее эволюции.

Проведена очередная модернизация графической системы поиска положения вспышки по результатам численного МГД моделирования в короне, которая позволила более удобным способом осуществлять вывод параметров, характеризующих предполагаемое место вспышки. Применение модернизированной графической системы поиска к полученным результатам МГД моделирования показало появление токовых слоев в окрестности особых линий X-типа в корне, подтвердив предлагаемый механизм вспышки. Кроме того, проведенное МГД моделирование показало появление структур с током, образовавшихся в местах наложения конфигурации поля вблизи особой линии X-типа с расходящимся магнитным полем, возникающим в плазменной ловушке типа пробкотрона. Появление дополнительных магнитных сил, вызванных взаимодействием тока вдоль оси особой линии с расходящимся магнитным полем, приводит к закручиванию магнитного поля, препятствуя накоплению большой магнитной энергии. Возможно, появление вспышек малой мощности и микровспышек объясняется такими структурами, которых, как показало моделирование, образуется значительно больше, чем токовых слоев. Полученные распределения магнитного и электрического полей вблизи предполагаемых мест вспышек позволило начать подготовительную работу для расчета траекторий заряженных частиц с целью изучения происхождения как солнечных, так и галактических космических лучей.

Для того, чтобы ослабить влияние нефотосферной границы, условия на которой должны наилучшим образом аппроксимироваться условиями свободного выхода, область короны над активной областью с сильным магнитным полем, в котором происходят вспышки, находилась в центральной части расчетной области и была окружена областью большого размера со слабым магнитным полем. Численная неустойчивость, появившаяся вследствие неаккуратной аппроксимации условий свободного выхода, вызвала быстрое течение разреженной плазмы в области слабого магнитного поля, которое на первом этапе эволюции АО не оказывало значительного влияния на процессы в области сильного магнитного поля, которые удалось приближенно исследовать. Однако, появление такой неустойчивости указывает на необходимость проведения более точного моделирования в условиях аккуратной аппроксимации свободного выхода, которую имеется возможность установить благодаря полученным результатам расчета.

ПРИМЕНЕНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИССЛЕДОВАНИИ МЕХАНИЗМА СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ ПУТЕМ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В КОРОНЕ

Борисенко А.В.¹, Подгорный И.М.², Подгорный А.И.¹

¹ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru

²ИНАСАН, г. Москва, Россия

Несмотря на применение специально разработанных методов, при численном решении МГД уравнений в солнечной короне над активной областью вблизи фотосферной границы, где имеются сильные градиенты магнитного поля, возникает медленно нарастающая численная неустойчивость. Для ограничения влияния этой неустойчивости необходимо выбирать очень малые временные шаги ($\sim 10^{-6}$ суток и даже меньше), что в свою очередь приводит к большим временным затратам на проведение вычислений. Ранее проведенное моделирование в сокращенном масштабе времени показало появление максимумов плотности тока, маскирующих токовые слои, что затрудняло определение местоположения первоисточника вспышки, а следовательно сопутствующих некоторым вспышкам солнечных космических лучей, радиация от которых может пагубно повлиять на людей и технику не только в околоземном космическом пространстве, но и особенно в полярных широтах на Земле. Появление таких максимумов плотности тока для ранее проведенного МГД моделирования в сокращенном масштабе времени было вызвано не естественно быстрым изменением фотосферного магнитного поля (в 10000 раз меньше реального масштаба времени).

Чтобы избежать появления таких “ложных” токовых слоев необходимо проведение численного моделирования решения системы МГД уравнений в реальном масштабе времени. Без применения современных НРС параллельных вычислений на решение такой задачи уходит несколько лет. Полученные результаты применения НРС (высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерах) параллельных вычислений на кластере по технологии CUDA сократило время решение задачи более чем в 100 раз, по технологии OpenMP в 50-70 раз, по сравнению с последовательной программой. Получены первые результаты МГД моделирования в реальном масштабе времени АО 10365 показали появление меньшего количества “ложных” токовых слоев, по сравнению с раними результатами расчета в сокращенном масштабе времени, что весьма обнадеживает оправданность применения дорогих современных НРС параллельных вычислений с применением как многопроцессорных CPU, так и графических GPU вычислений на примере задач солнечной и солнечно-земной физики.

ФОРМИРОВАНИЕ TGE И TGF В МОДЕЛЯХ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

Зелёный М. Е., Стадничук Е. М.

ИЯИ РАН, г. Москва, Россия; МФТИ (ГУ), г. Долгопрудный, Россия
mihail.zelenyy@phystech.edu

Для объяснения явления terrestrial gamma flash (TGF) и образования грозового разряда некоторые современные модели полагаются на существование положительной обратной связи, усиливающей лавину релятивистских убегающих электронов за счет рождения позитронов (которые двигаясь в поле в противоположную по сравнению с электронами сторону, рожают новые затравочные электроны в верхней части облака) и обратного рассеяния гамма-квантов (которые также могут создать новый затравочный электрон в верхней части облака). В этом докладе мы хотим представить результаты нового Монте-Карло моделирования (использующего транспортный код GEANT4) лавин релятивистских электронов, учитывающего ряд дополнительных факторов, оказывающих влияние на динамику лавины, и рассматривающего условия более приближенные к реальным условиям в грозовом облаке. В частности:

- более точно учтена зависимость процессов рождения, распространения и рассеяния от плотности атмосферы,
- учтено высотное распределение точек рождения затравочных электронов,
- проведено сравнение различных физических моделей электромагнитных взаимодействий.

В результате моделирования было показано, что обратная связь не может оказать существенного влияния на развитие лавин в обычных условиях грозовых облаков (может дать усиление лавины порядка 10 %, примеры на рис. 1) и может создать самоподдерживающиеся процессы только в очень экстремальных условиях при больших значениях электрического поля (приблизительно больших 10 кВ/см) или при значительных размерах областей с электрическим полем (более 1 км). Работа выполнена при поддержке Российским Научным Фондом, проект 17-12-01439.

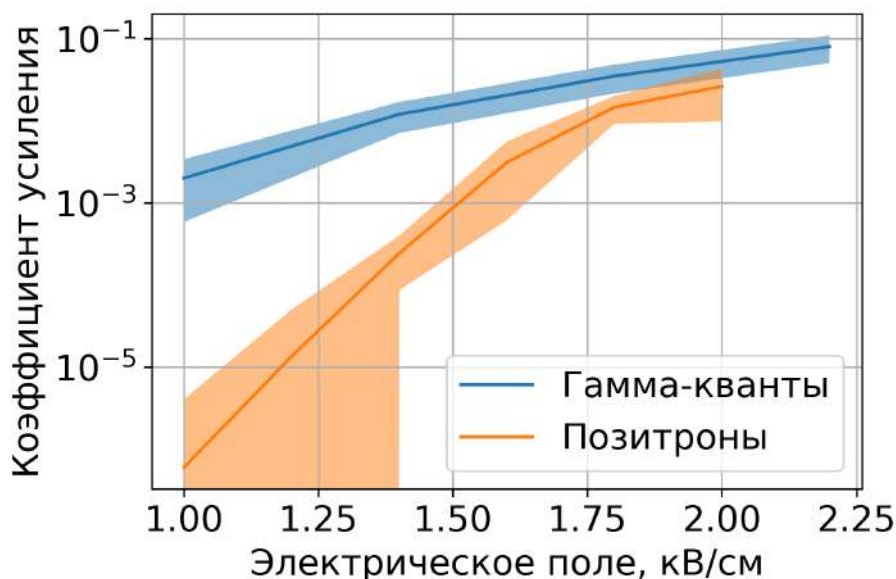


Рисунок 1: Коэффициент усиления для следующих параметров: энергия затравочной частицы — 3 МэВ, размер облака — 400 метров, давление — 0.5 атмосферы.

ХАОТИЧЕСКАЯ РЕАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ

Стадничук Е.М., Нозик А.А., Зелёный М.Е.

МФТИ, г. Долгопрудный, Россия, egrstadnichuk@yandex.ru

В широко известной модели Дваера считается, что в динамике лавин убегающих электронов существуют сильные механизмы обратной связи за счёт гаммы и позитронов внутри ячейки (область с однородным критическим электрическим полем). Если в грозовом облаке несколько ячеек, возможен другой механизм усиления лавин убегающих электронов за счёт обмена высокоэнергичными частицами между различными ячейками. Пусть в случайной ячейке образуется лавина убегающих электронов. За счёт тормозного излучения эта лавина создаёт гамму. Эта гамма, проходя через грозовое облако, способна родить новую лавину убегающих электронов в другой ячейке за счёт взаимодействия с молекулами воздуха. При определённых условиях такой процесс приводит к экспоненциальному росту потока гаммы внутри грозового облака. Такое поведение гамма квантов эквивалентно динамике нейтронов внутри ядерного реактора.

На начальном этапе разработки реакторной модели были сделаны следующие допущения:

- Электрическое поле является совершенно случайным, что делает производство фотонов изотропным.
- Между ячейками существует подкритическое электрическое поле; следовательно, между ячейками происходит только обмен фотонами.
- Критическое электрическое поле одинаково везде в облаке.
- Фотоны (гамма-лучи) имеют одинаковую среднюю энергию.
- Убегающие электроны имеют одинаковую среднюю энергию.
- Плотность воздуха одинакова во всем облаке.
- Гамма покидает систему двумя способами: они покидают грозовое облако или производят убегающий электрон, поскольку это приводит к значительной потере энергии гаммы.
- Форма грозового облака предполагается цилиндрической.

В данной работе получено решение уравнения динамики гаммы при данных упрощённых условиях, а также приведены экспериментально наблюдаемые свойства реакторной модели.

1. Gurevich A.V., Milikh G.M., Roussel-Dupre R. Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm // *Physics Letters A*. — 1992. — Vol. 165, no. 5. — Pp. 463 – 468. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037596019290348P>.
2. R. Dwyer J. A fundamental limit on electric fields in air // *Geophysical Research Letters*. — Vol. 30, no. 20. — URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2003GL017781>.
3. Gurevich Aleksandr V, Zybin Kirill P. Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms // *Physics-Uspekhi*. — 2001. — Vol. 44, no. 11. — P. 1119. — URL: <http://stacks.iop.org/1063-7869/44/i=11/a=R02>.

УНИТАРНАЯ ВАРИАЦИЯ В СЕЙСМИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ ЗЕМЛИ: СООТВЕТСТВИЕ КРИВОЙ КАРНЕГИ

Пулинец С.А.^{1,2}, Хачикян Г.Я.³

¹ИКИ РАН, г. Москва, Россия, pulse@rssi.ru

²ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

³ИИ, г. Алматы, Казахстан

Гистограмма распределения количества землетрясений в зависимости от мирового времени (UT) построенная по данным о землетрясениях с магнитудой $M \geq 4.5$, произошедших на планете в 1973-2017 гг. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>, (более 226 тысяч событий), показывает, что наименьшее количество сейсмических событий с такой магнитудой приходится на промежуток времени 03-04 UT, а наибольшее - на промежуток времени 13-21 UT с пиком в 17-18 UT. Разность в числе землетрясений между 03-04 UT и 17-18 UT составляет для планеты в целом $\sim 14.6\%$, а для особо сейсмоактивной территории, расположенной в юго-восточной части Азии и ограниченной координатами: 5°N - 25°S ; 80°E - 210°E , эта разность максимальна и достигает $\sim 22.3\%$. Характерно, что такая же зависимость надежно выделяется и при анализе короткого временного ряда (рис.1а), демонстрируя при этом соответствие с аналогичными UT- вариациями в грозовой деятельности планеты и в вертикальной компоненте электрического поля в регионах «хорошей погоды» (рис. 1b), которые являются элементами Глобальной Электрической Цепи и соответствуют Кривой Карнеги.

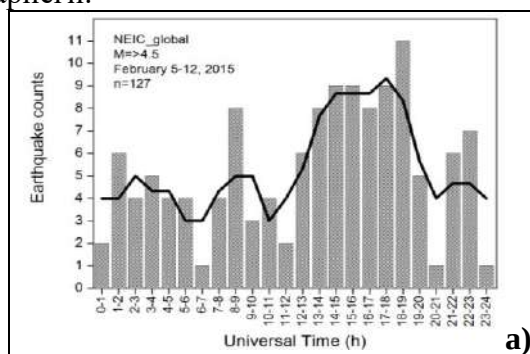


Рис. 1а. Гистограмма распределения в 1-часовых интервалах количества землетрясений с магнитудой $M \geq 4.5$, зарегистрированных на планете 5-12 февраля 2015г. (столбики), черная кривая – скользящее среднее по 3 часам.

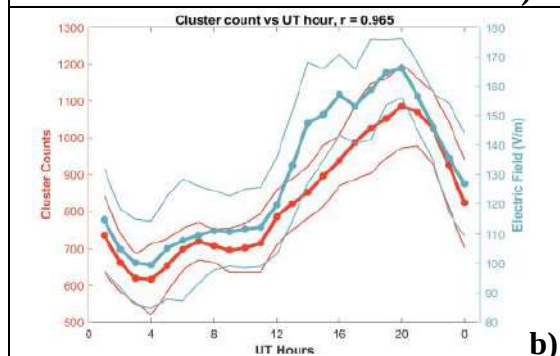


Рис.1b. Результат из работы [1]: усредненные за восемь дней (5-12 февраля 2015г) UT-вариации в количестве зарегистрированных на планете кластеров молниевых разрядов (красные кривые) и в вертикальной компоненте электрического поля «хорошей погоды» (станция «Восток» Антарктида - синие кривые), где тонкие линии указывают величину среднеквадратического отклонения.

В целом, полученные результаты поддерживают идею [2], что процесс подготовки землетрясение связан с процессами в Глобальной Электрической Цепи.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (РНФ) проект № 18-12-00441

1. Fang Y., et. al. Global electric circuit: lightning & precipitation sources. 2019. AGU Fall Meeting 9-13 December 2019. San Francisco. California. USA. AE13B-3217.
2. Pulinet S.A., 2009. Physical mechanism of the vertical electric field generation over active tectonic faults. *Advances in Space Research* 44 (6), 767–773. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2009.04.038>.

ПРОГНОЗ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ СПЕКТРОВ, НОВОГО РЯДА ПЯТЕН И НЕКОТОРЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПОЯВЛЕНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, tvkuz3@gmail.com

Цель данной работы – поиск причин изменений солнечной активности и появления экстремальных магнитных бурь в прошлом, настоящем и недалеком будущем. Для этого используются спектры чисел W и геофизических данных, а также анализ нового ряда солнечных пятен (ISN.v.2) [1]. Для расчета спектров применялся МГМ метод, который может количественно выделять из данных как тренды, так и нестационарные колебания [2]. На основе анализа спектров W и ряда пятен S показано, что вариации очень похожи в двух 31-л. интервалах 1848-1879 и 1989-2020 (между S_{mx} 9 цикла и минимумом S_{mn} 12-го; между S_{mx} 22 цикла и S_{mn} 25 в 2020 г.). Похожи S_{mx} циклов 9 (1848/02 с $S_{mx}=219.9$) и 22 (1989/11 с $S_{mx}=212.5$), разделенные периодом $T=141.7$ л. S_{mx} циклов 10 (1860/02 с $S_{mx}=186.2$) и 23 (2001/11 с $S_{mx}=180.3$) удалены также на $T=141.6$ л. Минимумы S_{mn} последующих циклов 11 (1867/03) и 24 (2008/12), 12(1878/12) и 25 (2020/09) разделены $T=141.7$ л. $T=(30.5\pm0.5)$ г и $T=142$ г. были найдены нами в спектрах W и изотопа C^{14} . Через 141.7 г. от S_{mx} цикла 11 в 1870 г. сопоставимый с основным S_{mx} был пик и в 2012 г. в цикле 24. Северное полушарие Солнца достигло S_{mx} за 2 г. до пика в южном полушарии, а северный полюс имел знак + до середины 2012. В июле 2012 г. NASA STEREO-A зарегистрировал СМЕ с параметрами, которые могли вызвать бурю класса Кэррингтона, но СМЕ прошло мимо Земли. Очевидно, что для появления экстремальных магнитных бурь необходимы как экстремальные события на солнце, так и нахождение Земли на линии с Солнцем. В интервал попадает экстремальная буря Кэррингтона (БК) в сентябре 1859 г. вблизи S_{mx} 10 цикла. Через 141.6 г. от БК в марте 2001 г. вблизи S_{mx} 23 цикла произошла большая буря с $Dst=-387$ нТл (у БК $Dst\sim-1700$ нТл). От БК через 62 г. в мае 1921 г. (фаза спада 15 цикла) произошла буря, которая, возможно, имела Dst , близкое БК, по мнению ряда авторов. И наконец через 50 л. от БК в сентябре 1909 г. (фаза спада 14 цикла) была буря с $Dst\sim-595$ нТл, а еще через 50 л. в 1959 г. буря с $Dst=-429$ нТл (вблизи S_{mx} самого мощного 19 цикла). Тенденция возникновения больших магнитных бурь во время фазы спада солнечного цикла не присутствовала в солнечных циклах 11-13, что говорит о сдвиге фазы колебаний компонент солнечного цикла в 14 цикле. В заключение прогноз. Автор предполагает, что минимум 25 цикла наступит в 2020 г. (вторая половина года), а минимум 26 цикла в 2031 г, максимум 25го цикла $S_{mx}\sim 100(110)$. Прогноз для максимума 24 цикла мало отличается от нашего прогноза в 1997 г. [3], а длительность 24 цикла увеличивается до 11.9 л. в новом прогнозе. Весь анализируемый интервал (1848-2020) равен 172 г, соединению Уран-Нептун (UN). В спектре самого длинного ряда D-компоненты геомагнитного поля основные периоды – это гармониками UN [4], что указывает на важную связь изменений на солнце и геомагнитного поля. Обсуждаются также общие периоды спектров СА, геомагнитного поля и движения планет.

Литература

1. List of solar cycles (ISN.v.2.0) https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_solar_cycles
2. Tsirulnik L.B., Kuznetsova T.V., Oraevsky V.N. Planet. and Space Science, v. 44, № 2, p. 241-250, 1997.
3. Tsirulnik L.B., Kuznetsova T.V., and Oraevsky V.N., Adv. Space Res., vol. 20, pp. 2369-2372, 1997.
4. Кузнецова Т.В., Цирульник Л.Б. Труды VII-го симпозиума по солнечно-земной физике России и стран СНГ, Троицк, стр. 113-119, 1999.

Воздействие 11-летнего цикла солнечной активности на климат северной Атлантики

Manifestation of the 11-year solar activity cycle in North Atlantic climate

А.Н. Груздев, В.А. Безверхний
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

Ключевые слова: солнечная активность, 11-летний цикл, Североатлантическое колебание, давление на уровне моря, температура поверхности океана

Выполнен анализ колебаний приземного климата северной Атлантики в связи с 11-летним солнечным циклом по эмпирическим данным о давлении на уровне моря (ДУМ) и температуре поверхности океана (ТПО) Гадлеевского центра Великобритании за 1870-2012 гг. и значениям индекса Североатлантического колебания (САК). Сделан акцент на регионах Исландского и Азорского центров действия атмосферы (ЦДА). Использованы методы множественной линейной регрессии, кросс-спектрального и кросс-вейвлетного анализа. Декадные колебания ДУМ, запаздывающие на ~ 3 года относительно числа солнечных пятен, выявлены в окрестности Азорского ЦДА в зимний (с достоверностью $P=0.95$) и осенний ($P=0.9$) сезоны. Вариации ДУМ примерно в фазе с солнечным циклом отмечены осенью в области Исландского ЦДА ($P=0.95$). Декадные вариации ДУМ в Исландском ЦДА зимой ($P=0.95$) происходят приметно в противофазе с вариациями в Азорском ЦДА, но при меньшем (1 год) запаздывании относительно солнечного цикла. Связанные с солнечным циклом вариации ДУМ сопоставимы по амплитуде с вариациями, обусловленными влиянием Эль-Ниньо–Южным колебанием (ЭНЮК) и Атлантическим мультидекадным колебанием (АМК). Декадные вариации ТПО зимой и осенью в Азорском ЦДА и осенью в Исландском ЦДА находятся примерно в фазе с вариациями ДУМ, но при несколько большем запаздывании относительно солнечного цикла. Изменений ТПО в области Исландского ЦДА, связанных с солнечным циклом, в зимний сезон не выявлено. Декадные вариации ТПО в несколько раз слабее вариаций за счет АМК, но одного порядка величины с изменениями, обусловленными влиянием ЭНЮК. Связь индекса САК с солнечным циклом проявляется при задержках индекса на 1 год и 7 лет относительно числа солнечных пятен. Она знакопеременная и испытывает модуляцию с периодом около 50 лет, который включает интервал с положительной корреляцией и интервал с отрицательной корреляцией. Показано, что эта модуляция может быть связана с эпизодами повышенного солнечного воздействия на климат.

ЦИРКУЛЯЦИЯ НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СЕКТОРОВ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ. ВОЗМОЖНАЯ СВЯЗЬ С ВНЕЗАПНЫМИ СТРАТОСФЕРНЫМИ ПОТЕПЛЕНИЯМИ

¹Куколева А.А., ¹Кононова Н.К., ²Погорельцев А.И., ¹Криволицкий А.А., ³Ишков В.Н.

¹Центральная аэрологическая обсерватория Росгидромет, Московская область, г. Долгопрудный, Россия, kuan-012@yandex.ru

²Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия

³ИЗМИРАН, Москва, Россия

Исследована связь циркуляции в тропосфере Северного полушария с пересечением границ межпланетного магнитного поля. Проведен анализ внезапных стратосферных потеплений (ВСП) в эти периоды. Для этого в период самих ВСП и 2 недели до события рассмотрены повторяемости различных форм циркуляции атмосферы Северного полушария по классификации Дзердзеевского [1]. Информация о направлении межпланетного магнитного поля (ММП) по [2]. Для определения периодов ВСП использованы данные реанализа об изменении температуры и скорости среднезонального ветра за 2006-2019 гг (декабрь-март) по базе данных Modern Era Retrospective-Analysis for Research and Applications (MERRA) [3].

Проведенный анализ связи различных форм циркуляции и смены знака магнитного поля (независимо от наличия ВСП) за 2006-2014 гг. зимой показал, что через сутки после смены знака ММП в среднем растет повторяемость Меридиональной Северной (МС) группы циркуляции (на 10-20%) по сравнению со среднегодовым значением в согласии с [4]. Для МС группы характерно наличие 2-4 блокирующих процессов над полушарием и антициклон над полюсом. Поскольку по современным теоретическим представлениям блокирующие процессы в тропосфере могут приводить к ВСП, был проведен соответствующий анализ связи времени наступления ВСП и изменения границы сектора ММП, который показал, что число потеплений, перед началом которых ММП имело отрицательное направление (к Солнцу), вдвое больше случаев с положительным знаком ММП (от Солнца) - 65% и 30%, соответственно от полного числа случаев (N=20). В этой преобладающей группе магнитное поле изменяет знак (+/-) за 1-2 дня до начала ВСП в 77% случаев, а в остальных – за неделю и более.

Предварительно можно сделать вывод, что пересечение границ ММП влияет на продолжительность блокирующих ситуаций в нижней тропосфере, и что для наступления ВСП благоприятна отрицательная фаза ММП в сочетании с некоторыми формами циркуляции, сопровождающиеся эти блокирующие процессы. Для установления более надежной связи циркуляции и фаз ММП предполагается в будущем расширить выборку.

1. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов северного полушария по Б.Л.Дзердзеевскому. Российская акад. наук, Ин-т географии. – М. Воентехиниздат, 2009. 372 с.
2. Ишков В.Н. ИЗМИРАН Москва: <http://www.izmiran.ru/services/saf/archive/ru/>
3. Rienecker, M.M., Suarez, M.J., Gelaro, R., et al., 2011. MERRA: NASA's Modern-era retrospective analysis for research and applications. J. Clim. 24, 3624–3648. https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA/data_access/
4. Wilcox J.M. Solar magnetic structure: Influence on stratospheric circulation. // Science. 1973. V. 180. P.185-186.

Скорости ионизации озона в полярных областях под действием протонов от солнечных вспышек в сентябре 2017 г. по данным измерений на российских спутниках МЕТЕОР и ЭЛЕКТРО в сравнении с расчетами по данным спутника GOES.

Е.А. Гинзбург¹, А.А. Кривоуццкий², А.А. Куколева², И. Н. Мягкова^{2,3}

¹Институт прикладной геофизики им. Академика Е.К. Федорова, Москва, Россия

²Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО), г. Долгопрудный, Россия

³НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

До настоящего времени при рассмотрении эффектов воздействия солнечных протонов на атмосферу Земли в качестве основных источников данных о потоках протонов СКЛ используются данные с американских спутников серии GOES. Вместе с тем имеется довольно длинный и однородный ряд измерений потоков солнечных протонов на отечественных спутниках, в первую очередь на полярных спутниках Метеор на высотах ~800-900 км, а с 2011 года – на геостационарных спутниках Электро. Большая часть измерений осуществляется в диапазоне энергий от нескольких МэВ до нескольких десятков МэВ, а в трех интегральных каналах черенковского счетчика на Метеоре и на Электро регистрируются протоны с энергиями более 600, 800 и 1100 МэВ.

На этой основе для солнечных протонных событий в сентябре 2017 г. проведен сравнительный анализ спектров протонов по измерениям на спутниках Метеор, Электро и GOES. Было установлено, что спектры протонов по данным российских и американского аппаратов достаточно близки друг к другу, имеют экспоненциальный характер. Эти обстоятельства вызвали к жизни решение (авторов) рассчитать скорость ионизации воздуха в полярной области северного полушария отдельно по данным каждого из спутников и сравнить результаты расчетов. Для расчетов скорости ионизации была использована методика, предложенная в 1996 году американскими учеными (Vitt and Jackman). Проведенные расчеты показали близкие значения скоростей ионизации полярной атмосферы, за исключением низких высот. Таким образом, можно сделать предварительное заключение, что отечественные данные спутника Метеор можно использовать для фотохимических расчетов, при мониторинге полярной озоносферы и нижней ионосферы.

ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ЯНВАРЯ 2005 ГОДА НА СОСТОЯНИЕ СТРАТОСФЕРНОГО ПОЛЯРНОГО ВИХРЯ

Веретененко С.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, s.veretenenko@mail.ioffe.ru

Стратосферный полярный вихрь играет важную роль в физическом механизме влияния солнечной активности на циркуляцию нижней атмосферы во внетропических широтах, что обусловлено благоприятным расположением области формирования вихря для высыпаний энергичных заряженных частиц (солнечных и галактических космических лучей, авроральных электронов, электронов радиационных поясов). Согласно данным [1], мультideкадные колебания интенсивности полярного вихря оказывают существенное влияние на характер солнечно-атмосферных связей.

В настоящей работе исследуются изменения интенсивности вихря (скорости западного ветра в стратосфере высоких широт) в ходе мощных солнечных протонных событий (СПС) 15-20 января 2005 года на основе данных реанализа NCEP/NCAR [2]. Обнаружено, что в исследуемый период произошло значительное усиление ветра в верхней и средней стратосфере, увеличение по долготе области высоких значений скорости ветра и смещение этой области на восток, от арктического побережья Северной Америки к Северной Атлантике. Показано, что помимо СПС интенсификации полярного вихря может также способствовать авроральная активность. Полученные результаты позволяют предположить, что изменения скорости ионизации в высокоширотной атмосфере, обусловленные всплесками солнечных космических лучей и высыпаниями авроральных электронов, являются возможными факторами интенсивности стратосферного полярного вихря.

1. Veretenenko S., Ogurtsov M. // Adv. Space Res. 2014. V. 54. P. 2467.
2. Kalnay E. et al. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1996. V. 77. P. 437.

АТМОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРОТОННЫХ ВСПЫШЕК НА СОЛНЦЕ 2012 И 2017 ГОДОВ (ТЕХМЕРНОЕ ФОТОХИМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Куколева А.А., Мягкова И.Н., Гинзбург Е.А., Кирюшов Б.М.

ЦАО Росгидромета, Россия, krivolutsky@mail.ru

Трехмерная фотохимическая модель ЦАО CHARM [1] была использована для расчета отклика озоносферы на воздействие наиболее сильных протонных вспышек на Солнце 24-го цикла активности: март 2012 года и сентябрь 2017 года. Модель описывает взаимодействие 54-х малых газовых составляющих (озон и другие), участвующих в 145 фотохимических реакциях в диапазоне высот 0-90 км. Необходимые для учета пространственного переноса (схема Пратера) компоненты скорости, а также температура, рассчитывались с помощью модели общей циркуляции ЦАО ARM. В фотохимической модели использовались среднесуточные рассчитанные трехмерные поля компонент скорости ветра и температуры. Для учета воздействия вспышки на химический состав использована концепция образования дополнительных окислов азота и водорода при ионизации полярной атмосферы частицами. Потоки частиц брались с сайта NASA (спутник GOES). Данные окислы разрушают озон в каталитических химических циклах. Для расчета соответствующих скоростей ионизации была использована методика, предложенная в работе [2]. Проведенные расчеты показали, что разрушение озона не превышает 10%. Анализ наблюдений озона со спутников для высоких широт северного полушария и для периода вспышки 2017 года обнаружил возмущения в содержании озона, однако такой четкой картины, которую дает модель (разрушение озона) не было получено. Причина этого, вероятно, в том, что при слабых вспышках эффект трудно обнаружить из-за ошибок измерений. Обсуждаются перспективы использования для мониторинга полярной озоносферы данных отечественных приборов, установленных на спутнике «Метеор».

1. Криволуцкий А.А., Вьюшкова Т.Ю., Черепанова Л.А., Куколева А.А., Репнев А.И., Банин М.В. Трехмерная глобальная фотохимическая модель CHARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия 2015. Т 55. С. 64.
2. Vitt F.M., Jackman C.A.//J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 6729.

МОДЕЛЬ АТМОСФЕРНОЙ ИОНИЗАЦИИ В ПЕРИОД СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ

Яковчук О.С.^{1,2}, Виссинг Я.М.¹

¹Университет Оснабрюк, Оснабрюк, Германия, oyakovchuk@uos.de

²НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

В нашей работе мы представим новую модель, описывающую атмосферную ионизацию, в том числе во время суббурь.

В модели используются модифицированная система координат APEx [1], учитывающая местное магнитное время и магнитную долготу.

Модель основана на средних статистических данных спутников POES и METOP, в сочетании с данными в реальном времени. Проведён анализ пространственной картины выпадения частиц в широком диапазоне энергий. Используя полученные на этой основе спектры частиц и инструмент для взаимодействия энергичных частиц с веществом (GEANT4), рассчитывается результирующая атмосферная ионизация.

Для определения начала суббури используется SML-индекс [2]. Таким образом, мы различаем три периода суббуревой активности: изолированную суббурю, суббуревой период и спокойный период без какой-либо активности.

Другие особенности нашей модели:

- эмпирическое определение границ полярной шапки, с учётом местного магнитного времени и зависимости от Кр-индекса.
- отдельное рассмотрение конуса потерь, связанного с Южно-атлантической аномалией.

Данные модели доступны за период с 2001 по 2018 год.

В работе представлены описание модели и её первые результаты.

Работа выполнена при поддержке гранта немецкого научного фонда (DFG; грант № WI4417/2-1).

1. Richmond A. D. // J. Geomagn. Geoelectr. V. **47**. P.191–212.

2. Newell P. T., Gjerloev J. W. // J. Geophys. Res.-Space 2011. V. **116**. P. A12211.

О ПРИРОДЕ ОПТИЧЕСКИХ ВСПЫШЕК, НАБЛЮДАВШИХСЯ НА СПУТНИКАХ «УНИВЕРСИТЕТСКИЙ-ТАТЬЯНА» И «ВЕРНОВ»

Сурков В.В.

НПК «СПП», г. Москва, Россия, surkovvadim@yandex.ru

ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия

В последнее время появились публикации о наблюдениях на низкоорбитальных спутниках вспышек света в атмосфере, отличающимся по морфологии, высоте и энергии от известных световых явлений типа спрайт, голубая струя и эльфы [1]. Измерения на спутниках «Университетский-Татьяна», «Университетский-Татьяна-2» и «Вернов» в ультрафиолетовом (УФ), красном и инфракрасном диапазонах показали, что большинство зарегистрированных вспышек находились в экваториальной области в облачных районах. Однако прямой корреляции с молниевыми разрядами не было обнаружено, причём наиболее мощные УФ вспышки были зафиксированы над океанами, а не над материками.

В настоящей работе исследуется модель электрических разрядов на мезосферных высотах, которая позволяет объяснить происхождение таких оптических вспышек, наблюдавшихся на спутниках «Университетский-Татьяна» и «Вернов». Модель основана на предположении о существовании в мезосфере больших заряженных областей с низкой плотностью объёмного электрического заряда и низким уровнем электрического пробоя воздуха. Изменение концентрации электронов и ионов в сформировавшемся канале разряда описывается кинетическими уравнениями в пренебрежении пространственными производными. Учитывается зависимость от высоты параметров разрядного процесса, таких как подвижности заряженных частиц, скорости ионизации и прилипания электронов к нейтральным молекулам. Численное и аналитическое исследование уравнений для разных высот в атмосфере позволило рассчитать зависимость от времени электрического поля, силы тока, электропроводности и концентрации электронов и ионов в канале разряда. Анализ полученных решений показывает, что амплитуда и длительность «импульса» тока в канале разряда определяются, в основном, процессами ударной ионизации воздуха и диссоциативного присоединения электронов к нейтральным молекулам.

Наилучшее согласие между расчётами и данными спутниковых наблюдений за оптическими вспышками получено в предположении, что электрические образования располагаются на высотах около 60–70 км, имеют размеры порядка 10 км и полный заряд порядка 1 Кл. Теория предсказывает, что в этих условиях энергия, выделяемая при электрических разрядах, может достигать от долей до нескольких МДж, а длительность разрядов составлять несколько мс.

1. Klimov P., Garipov G., Khrenov B., Morozenko V., Barinova V., Bogomolov V., Kaznacheeva M., Panasyuk M., Saleev K., Svertilov S. // J. Applied Meteorology and Climatology 2017. V 56. P 2189.

ТРИГГЕРНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ДЛЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Новиков В.А., Сорокин В.М., Яценко А.К., Ружин Ю.Я., Ключкин В.Н.

ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, novikov@ihed.ras.ru

Результаты исследований возможной взаимосвязи солнечной активности и сейсмичности Земли, полученные к настоящему времени, являются неопределенными, а в ряде случаев - противоречивыми, что исключает возможность сделать однозначный вывод о наличии/отсутствии такой связи и, тем более, практически использовать эти результаты для решения проблемы снижения сейсмической опасности. Все это обусловлено тем, что в предыдущих исследованиях был использован только статистический анализ рядов регистрации параметров солнечной или геомагнитной активности и землетрясений без физического обоснования возможности (или ее отрицания) инициирования сейсмических событий процессами в системе "солнце-магнитосфера-ионосфера-атмосфера-литосфера".

В настоящей работе сделана попытка создания физической модели воздействия ионизирующего излучения солнечных вспышек на очаги землетрясений с ее последующей проверкой в лабораторных экспериментах и полевых условиях. Рассмотрен один из возможных механизмов инициирования землетрясений солнечных вспышек - воздействие на сейсмогенный разлом земной коры возмущений электрического поля, электрического тока и тепловыделения в разломе, обусловленных поглощением ионизирующего излучения солнечных вспышек. Численными экспериментами показано, что в результате крупномасштабного в горизонтальном направлении возмущения проводимости нижней области ионосферы в присутствии внешнего электрического поля возможна генерация возмущений геомагнитного поля в диапазоне периодов единицы-десятки секунд. Амплитудно-временные характеристики сигнала определяются возмущением интегральных проводимостей ионосферы. В зависимости от соотношения между интегральными проводимостями Холла и Педерсена возмущенной ионосферы может наблюдаться осциллирующий и апериодический режимы магнитных возмущений. Для сильных возмущений проводимости ионосферы амплитуда пульсаций может достигать $\sim 10^2$ нТл. При этом, амплитуда горизонтальной компоненты электрического поля на поверхности Земли может достигать 0,01 мВ/м, плотность электрического тока в литосфере - 10^{-6} А/м², а плотность мощности выделения тепла этим током - 10^{-7} Вт/м³, что сопоставимо с плотностями тока, генерируемыми в земной коре искусственными импульсными источниками (геофизическим МГД-генератором "Памир-2" и электроимпульсной установкой "ЭРГУ-600"), вызывающими инициирование региональных землетрясений и пространственно-временное изменение сейсмической активности, подтвержденное как натурными наблюдениями вариаций сейсмичности на Памире и Северном Тянь-Шане, так и лабораторными экспериментами на прессовом оборудовании и пружинно-блочных моделях, имитирующих сейсмогенный разлом. Полученные численные результаты подтверждаются лабораторными экспериментами по изучению генерации тока в разломе внешним электромагнитным полем. Для условий экспериментов плотность тока в разломе может превышать на два порядка плотность тока во вмещающих горных породах. Кроме того, вывод о возможности инициирования землетрясений солнечными вспышками подтверждается анализом глобальной и региональной сейсмичности (Греция) после самой сильной вспышки класса X9.3 6 сентября 2017 г. за последние двенадцать лет, когда сейсмичность в течение 10 суток после солнечной вспышки выросла на 65% по сравнению с аналогичным периодом до вспышки.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00962.

ВЛИЯНИЕ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ МИРОВОГО ОКЕАНА

Зайцев А.Н., Шерстюков Б.Г.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, alex.zaitsev1940@mail.ru
ВНИИГМИ-МЦД, г.Обнинск, Россия, boris@meteo.ru

Со времени начала проведения исследований глобальных изменений в состоянии атмосферы и океана было обнаружено, что океан является одним из основных элементов, управляющих долговременными изменениями климата. В настоящее время ведутся интенсивные поиски причинно-следственных связей в системе атмосфера-гидросфера с другими оболочками Земли и внешними факторами. Допускается, что одной из причин колебаний климата океана и атмосферы являются многолетние вариации магнитного поля Земли. Вариации МПЗ сопровождаются развитием токовых систем в магнитосфере Земли и, в частности, развитием экваториального кольцевого тока в магнитосфере, интенсивность которого фиксируется индексом Dst. Во внутренних слоях Земли и в океане, как в токопроводящей среде, могут возникать аналогичные зональные электрические токи. Подобные явления известны в магистральных электрических линиях [1]. Проверка предположений выполнена с помощью анализа статистических зависимостей между долговременными вариациями состояния магнитного поля земли (Dst - вариации) и параметрами океанических течений.

С целью обнаружения связи океан - магнитное поле выполнен асинхронный корреляционный анализ среднегодовых значений Dst и температуры поверхности Мирового океана в узлах географической сетки 2*2 градуса за 1957-2018 годы со сдвигами от 0 до 35 лет. По асинхронным коэффициентам корреляции в каждом узле определен сдвиг с наибольшим по модулю коэффициентом. Построена карта коэффициентов корреляций при наилучших сдвигах. Выделены поля со значимыми коэффициентами корреляции больше 0.6 по модулю.

Обнаружено, что многолетние колебания температуры поверхности океана в области циркумполярного зонального Антарктического течения в Южном океане и в области экваториальных течений Тихого и Атлантического океанов повторяют многолетние вариации Dst-индекса с запаздыванием 29 лет. Многолетнее запаздывание согласуется с известным временем запаздывания передачи возмущений из глубинных слоев океана на поверхность. Усиление магнитосферного кольцевого тока в период сильных магнитных бурь сопровождается понижением температуры поверхности океана на холодном Антарктическом и Южно-Пассатном течениях в Тихом океане (положительная корреляция ТПО с Dst, $R=0.5\div 0.8$) и повышением температуры на Южном Пассатном течении в Атлантическом океане (отрицательная корреляция ТПО с Dst, $R=0.5\div 0.7$).

Таким образом обнаружена статистически достоверная связь между токами в магнитосфере и глобальными океаническими течениями. Вопрос о физической связи между явлениями на Солнце, в магнитосфере (Dst) и ТПО предстоит исследовать в дальнейшем [2].

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты 18-05-00721 и 18-45-160006

1. Белаховский В.Б., Пилипенко В.А., Сахаров Я.А., Селиванов В.Н. Характеристики вариабельности геомагнитного поля для изучения воздействия магнитных бурь на электроэнергетические системы // Физика Земли. 2018. №1. 173–185.
2. Шерстюков Б.Г. Момент инерции движения Солнца относительно центра масс Солнечной системы и долгопериодные колебания температуры поверхности океана // Труды ВНИИГМИ-МЦД. Вып.184. 2019. С.80-93.

Влияние солнечной активности на атмосферные процессы в Антарктике (обзор результатов исследований ААНИИ)

О.А.Трошичев, И.П.Габис, А.В.Франк_Каменецкий, С.Н.Шаповалов

Арктический и Антарктический НИИ, С.Петербург, Россия
olegtro@aaari.ru

Представлены результаты исследований, выполнявшихся в ААНИИ по трём основным аспектам указанной проблемы;

1. Связь аномальных атмосферных процессов в Антарктике с космической погодой.

Показано, что воздействие межпланетного электрического поля E_{KL} на атмосферные процессы в Антарктике реализуется через изменения глобальной электрической цепи и сводится к двум процессам: (1) **формирование облачного слоя над Центральной Антарктикой**, которое приводит к отражению длинноволновой радиации, идущей от ледяного купола; и нагреванию атмосферы ниже облачного слоя (внезапные потепления на станции Восток, до 20° в пределах полусуток), (2) **ускорение воздушных масс спускающихся из тропосферы**, которое приводит к росту давления в приземном слое атмосферы над ледяным куполом и увеличению скорости стоковых ветров. Когда скорость стоковых ветров достигает критически больших значений, циркумполярный вихрь в береговой зоне Антарктики распадается и холодный антарктический воздух вторгается в Южный океан. Если этот процесс продолжается долгое время, аномальные условия распространяются на значительную часть Южного океана, что обуславливает изменение крупномасштабной циркуляции во всём Южном полушарии (ENSO).

2. Межгодовые изменения общего содержания озона (ОСО) в Антарктиде.

Показано, что уровень весенней депрессии ОСО («озоновой дыры») определяется квазидвухлетней осцилляцией (КДО) в интенсивности переноса тропического озона в южную полярную область. Выявлены неизвестные ранее сезонные закономерности эволюции КДО, на основании которых разработана методика прогноза длительности циклов КДО и, соответственно, содержания озона на экваторе и в Антарктиде.

3. Изучение флуктуаций солнечного УФ излучения. На ст. Новолазаревская (Антарктика) проводились спектральные измерения солнечного УФ излучения в зените атмосферы в диапазоне 297-330 nm. УФ излучение в диапазоне NUV297-330 является основным источником образования тропосферного озона и фотодиссоциации в атмосфере и поэтому имеет фундаментальное значение в цепи механизма солнечно-атмосферных связей. Показано, что изменение энергии излучения в 11-летнем цикле солнечной активности не коррелирует с ходом солнечной активности, что может иметь прямое отношение к проблеме глобального изменения климата

ОСОБЕННОСТИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ ЛЕТОМ 2019 ГОДА И ПРОЯВЛЕНИЕ ОПАСНЫХ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

Мальнева И.В., Черкесов А.А.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (ФГБУ «ВГИ») malnir@mail.ru

В 2019 году как в мире в целом, так и в отдельных странах наблюдалось катастрофическое проявление опасных природных процессов. Изменилась активность природных процессов, наиболее чувствительных к погодным условиям. В Приэльбрусье произошла значительная активизация селей преимущественно ливневого генезиса, причем большая часть селей произошла в один день – 24 июля, в основном в долинах рек Баксан, Чегем, Черек, где совсем недавно произошла катастрофическая активизация селей связанная с прорывом озера Башкара. За летнее время авторами производились ежедневные наблюдения за характером погоды в Приэльбрусье по данным ГМС Терскол и показателями космической погоды по материалам сайта <http://spaceweather.com/> и wetterzentrale.com. Проведенные по этим данным исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Летом 2019 года, во время глубокого солнечного минимума, характер погоды отличался резкими колебаниями температуры воздуха в начале мая, повышением температуры в мае – июне по отношению к среднему многолетнему значению, когда еще наблюдались незначительные солнечные вспышки. Затем до конца лета на Солнце практически не было пятен, не было и вспышек. Скорость солнечного ветра редко превышала фоновое значение (300 км/сек), что характерно для солнечного минимума, но в это время может проникать больше космических лучей. Космические лучи являются важной формой космической погоды, Плотность протонов солнечного ветра была в целом не высока, но неоднократно появлялись кратковременные всплески значительно превышающие фоновое значение.

2. . При данном состоянии космической погоды, характерной для глубокого солнечного минимума, с начала июля на территории наблюдался циклонический характер погоды, частое прохождение фронтов. Вдоль гор часто отмечен фронт окклюзии, с которым связано формирование протяженной зоны облаков и осадков, который часто возникает за счет смыкания холодных и теплых воздушных масс. 23 и 24 июля отмечено, что погода у Земли будет определяться ложбиной с юга и влиянием холодного воздуха с северо-запада. Ожидался кратковременный дождь, местами с перерывами. Анализ синоптической ситуации на Северном Кавказе и конкретно в Приэльбрусье проведен по материалам Гидрометцентра Кабардино-Балкарской республики за наиболее селеопасный месяц – июль

3. Проявление опасных геологических процессов в июле 2019 года обусловлено дополнительным поступлением энергии, способствующим увеличению активности метеорологических факторов. Возмущения космической погоды начались 11 июля, резко увеличилась скорость солнечного ветра (почти до 600 км/с), 12 июля – прошли аномальные осадки по данным ГМС Терскол (48,8 мм), за этим последовало увеличение активности опасных процессов. Но массовая активизация оползней и селей в июле 2019 года произошла позднее. 18 июля пятен на Солнце не было уже 55 дней, практически не было вспышек. Во время этой фазы солнечного цикла солнечные пятна и солнечные вспышки редки, но мы получаем множество дополнительных космических лучей (<http://spaceweather.com/>).

24 июля Земли достиг поток солнечного ветра из небольшой корональной дыры. В ночь на 22 июля произошло протонное событие. Плотность протонов резко подскочила до 75 и выше от 10 ед./см³. Все это дало дополнительный приток энергии, который вместе со всеми природными факторами, способствовал активизации опасных геологических процессов. Следует отметить, что влияние космической погоды может проявить себя только тогда, когда для него будут подготовлены земные природные условия, в значительной степени определяющие активность опасных природных процессов.

ДЛИТЕЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ АРТЕРИАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ И ПУЛЬСА: ПРОЯВЛЕНИЕ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ В ЛОКАЛЬНЫХ ПОКАЗАНИЯХ

Шибает И.Г.¹, Кука Ю.И.², Исаккина О.Ю.³

¹ ИЗМИРАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, ishib@izmiran.ru

² ЦГЭМИ ИФЗ РАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия

³ ГИПМ (Государственный институт профилактической медицины), Москва, Россия

В работе используются ежедневные показания артериального давления (АД) и пульса – частоты сердечных сокращений (ЧСС) взятые из дневника самоконтроля, который ведет пациент – один из авторов данной публикации. Медицинское обследование пациента, проведенное в начале 1997 года, диагностировало артериальную гипертонию II стадии 2 ступени. С апреля 1997 г., после проведенного амбулаторного лечения, осуществляется ежедневный (утром и вечером) контроль за АД в домашних условиях под наблюдением врача. Длительный и эффективный контроль за состоянием пациента (более 18 лет) обеспечивает его нормальную жизнедеятельность и позволяет исследовать влияние внешних факторов на гемодинамику организма.

В предыдущих работах авторов [1, 2] упор делается на анализ длиннопериодных компонент исследуемых рядов и их взаимосвязи (спектр, корреляционные отношения и нормированная разность между показаниями САД и ДАД), что позволяет оценить влияние геофизических / атмосферных факторов на состояние пациента. Данная работа исследует проявление внешних факторов в локальных показаниях АД и ЧСС.

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

2. Kuksa Yu, Shibaev I, Isaikina O. Long-Term Monitoring of Arterial Blood Pressure and Pulse: Assessment of Influence of External Factors on Readings // Chapter 7 In: Emerging Research in Medical Sciences, V. 2, 2019, 58 – 68. DOI: 10.9734/bpi/erms/v2

Исключение эффекта снега для сети нейтронных мониторов на основе данных за 2018-2019 год

Трефилова Л.А., Кобелев П.Г., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Янке В.Г.

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia, trefilova@izmiran.ru

Объектом исследования работы являются данные нейтронных мониторов за 2018-2019 год. Некоторые станции, особенно расположенные в горах на средних и низких широтах, подвержены влиянию снега, который накапливается над детектором и вокруг него, что искажает наблюдаемые вариации. Поэтому данные мониторинга нейтронной компоненты требуют соответствующей корректировки. Так как не всегда есть возможность измерить толщину снега, применяется метод «опорной станции» для коррекции данных на снег. Корректировка на снег выполняется с помощью обновленной версии программы «SnowCorrection», которая была использована в работе [В.К. Коротков и др. 2011 г].

Таким образом, методом опорных станций проведена корректировка данных на снег для станций ESOI, Moscow, JungfrauJoch-nm64, AlmaAtaB, LomnitskyStit, Nain, Peawanuck. Результатом является также толщина снежного покрова и динамика его изменения на данной станции.

Предложенная методика позволяет быстро исправить данные с достаточно высокой точностью, тогда как «ручная» корректировка занимает много времени и является субъективной.

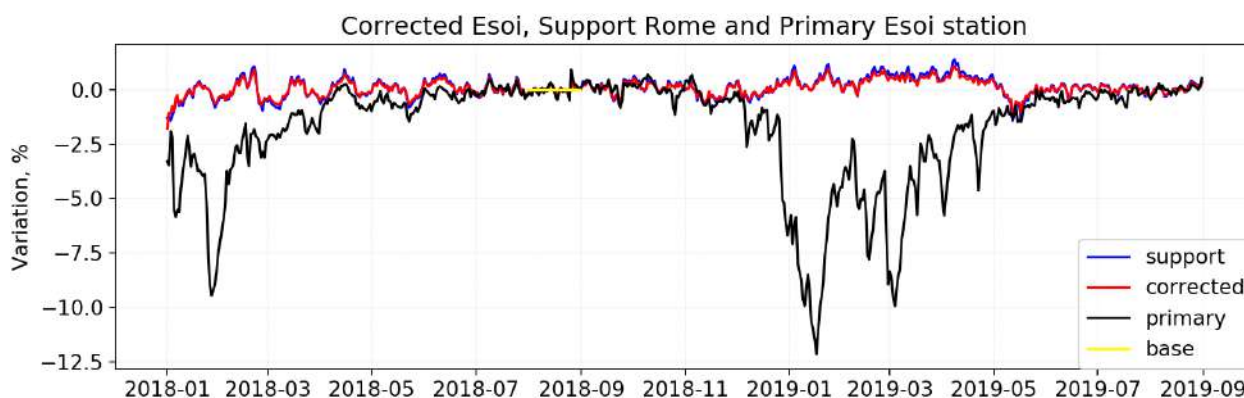


Рис. 1. Корректировка вариаций на станции ESOI с помощью опорной станции Rome за 2018-2019 гг. (среднесуточные).

В качестве опорной станции использовалась станция Rome, которая стабильно работает и где гарантированно отсутствует снег. Для контроля после тщательного отбора использовались также опорные станции JungfrauJoch-nm57, Inuvik, вариации на которых в некоторые периоды могут быть искажены присутствием некоторого количества снега.

Если в качестве опорной станции выбирается удаленная станция, то различие вариаций на этих станциях учитывается приемными коэффициентами этих детекторов.

Работа выполнена при поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 3 и 12. Работа базируется на экспериментальных данных УНУ "Российская национальная сеть станций космических лучей". Мы также признательны всем сотрудникам Мировой сети станций космических лучей <http://cr0.izmiran.ru/ThankYou>.

В.К. Коротков, М.Д. Беркова, А. В. Белов, Е. А. Ерошенко, П.Г.Кобелев, В. Г. Янке “Эффект снега в вариациях космических лучей и методы его учета” Геомagnetизм и аэрономия, том 51, № 2, стр. 250-256, 2011.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия, tvkuz3@gmail.com

Для сравнения спектров солнечной активности W и геомагнитного поля был привлечен МГМ спектр самого длинного ряда D -компоненты магнитного поля в Хартленде (с 1810 г). МГМ метод спектрального анализа описан в [1]. Компоненты с уровнем доверия более 99,8% имеют следующие периоды. Тренд в спектре D имеет наибольшую амплитуду и описывается нестационарной синусоидой с периодом $T_p \sim 334$ г. (нестационарные компоненты отмечены n). Компоненты спектра D по убыванию амплитуды имеют периоды: $T = 85,7$ г, $T = 47,5$ л. и $T_p = 28,3$ л. Из них $T = 47,5$ л. совпадает с T спектра W . А $T_p = 28,3$ л. можно рассматривать как 2 гармонику цикла Фрица с $T = 56$ л. (обнаруженную в данных по сияниям и солнечным пятнам). Компонента с $T_p = 10,2$ г. имеет спектральную полосу от 9,9 л. до 10,5 лет. Интересно отметить, что $T = 10,5$ л. близок к известному в солнечной физике периоду Коула, который в его гипотезе связан с генерацией солнечного цикла. Компонента с $T_p = 10,2$ г. - единственная среди пиков со статистической значимостью на уровне 99,8%, период которой близок в спектре W периодам $T = 11,0$ лет, $T = 10,7$ лет, $T = 10,0$ лет. Но в спектре D ее амплитуда меньше, чем A компоненты с $T = 8,8$ г, которая имеет относительно небольшую амплитуду в спектре W . $T = 8,8$ г. в спектре D можно интерпретировать как период вращения перигелия орбиты Луны. Отметим, что $T = 8,8$ г. равен 8 синодическим периодам Юпитера. А период вращения одноименного узла орбиты Луны $T = 18,6$ л. равен 18 синодическим периодам Сатурна. В спектре D есть также статистически значимые компоненты с $T(n) = 5,2$ уг., $T(n) = 4,3$ уг., $T = 16,9$ уг., $T = 21,1$ уг., $T(n) = 6,9$ уг. Приливные силы планет рассчитывались по формулам работы [2]. Показано, что приливные силы планет могут вызывать общие резонансные периоды в W и D . Симметричная составляющая приливных сил Кеплера представлена гармониками орбитальных периодов Урана и Нептуна в спектре D . Периоды асимметричной составляющей возмущенной приливной силы внешних планет (по отношению к Земле) обнаружены как в спектре W , так и D . Соединения планет присутствуют также в спектрах. Тот факт, что 12 гармоник периода соединения Уран-Нептун ($T = 171,4$ г.) находятся в спектре D (на уровне доверия 99,8%), указывает на важность этого цикла в генерации геомагнитного поля. Но для поддержки процессов, ответственных за геомагнитные вариации D , важны определенные полосы спектра солнечной активности.

Литература

1. Tsirulnik, L. B., Kuznetsova T. V., and Oraevsky V. N. Planetary and Space Science, 1997, v. 45, № 2, p. 241-250
2. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. Москва, ОИФЗ РАН, 1996.

ПРОНИКНОВЕНИЕ В ВЕРХНЮЮ ИОНОСФЕРУ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ И УСТАНОВКИ ЗЕВС

Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Мазур Н.Г.

Институт космических исследований РАН, Москва (pilipenko_va@mail.ru)

Институт физики Земли РАН, Москва

Геофизический Центр РАН, Москва

В работе моделируется проникновение электромагнитных КНЧ излучений в верхнюю ионосферу. В качестве источника взят длинный линейный ток над земной поверхностью. Такими источниками могут быть промышленные линии электропередач с частотами 50/60 Гц и установки для связи с подводными лодками (типа ЗЕВС на частоте 82 Гц). Получены высотные зависимости магнитного и электрического полей непосредственно над источником. Экспериментально показана возможность регистрации возмущений от установки ЗЕВС и линий электропередач на ионосферных высотах магнитометром и электрической антенной низкоорбитальных спутников.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 16-17-00121 «Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы»

УНЧ-волны в магнитосфере Земли, генерированные суббурями

Климушкин Д.Ю., Магер П.Н.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация

Рассматриваются свойства УНЧ-волн с большими азимутальными волновыми числами ($m \gg 1$), генерированных суббуревыми инжекциями в магнитосфере Земли: альфвеновские и дрейфово-компрессионные моды, сцепленные между собой за счет неоднородности плазмы и магнитного поля Земли. Рассматриваются два механизма генерации таких волн: излучение переменными токами, связанными с азимутальным дрейфом облаков инжектированных частиц, и кинетические неустойчивости, связанные с взаимодействием волн и частиц при наличии неравновесной функции распределения. Представлен обзор основных теоретических свойств этих мод, а также наблюдательные примеры каждой из них, зарегистрированные с помощью радаров и спутников. (Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ 18-17-00021).

УСИЛЕНИЕ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ЧАСТИЧНО ИОНИЗОВАННОЙ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ПЛАЗМЕ

Пичугин С.Ю., Рящиков Д.С., Молевич Н.Е.

СФ ФИАН, Самарский университет, г. Самара, Россия, ryashchikovd@gmail.com

В последнее время множество работ посвящено изучению особенностей распространения МГД-волн в частично ионизованной плазме. Нейтральные атомы, сталкиваясь с заряженными частицами, приводят к дополнительной диссипации волн в среде. Эффекты, связанные с ионно-нейтральными столкновениями, предложено описывать с помощью двухжидкостной модели, состоящей из ионно-электронной и нейтральной компонент [1, 2]. Показано, что учёт ионно-нейтральных столкновений позволяет более корректно описывать динамику высокочастотных возмущений (с частотой волны порядка частоты ионно-нейтральных столкновений), что может быть важно для описания волн в таких астрофизических средах, как хромосфера, фотосфера Солнца и протуберанцы.

Стоит отметить, что динамика волн в данных средах во многом определяется неадиабатическими процессами нагрева и охлаждения, которые приводят к возникновению дисперсии волн [3], а также их дополнительному затуханию или усилению (тепловая неустойчивость) [4]. В текущей работе мы рассматриваем дисперсионные свойства магнитоакустических волн с учётом как процессов тепловыделения, так и эффектов, связанных с ионно-нейтральными столкновениями. Для этого было получено дисперсионное соотношение для МГД-мод с использованием двухжидкостной модели, которое впоследствии в приближении постоянной степени ионизации было сведено к дисперсионному соотношению для МГД-мод в одножидкостной модели, что понижает порядок уравнения и упрощает его анализ.

Показано, что ионно-нейтральные столкновения приводят к затуханию магнитоакустических волн, подавляя усиление за счёт тепловой неустойчивости. Характерная частота ω_{col} , на которой происходит затухание волн, пропорциональна степени ионизации. Когда она сравнивается с характерной частотой источника тепловыделения ω_Q , что происходит в слабоионизованной плазме, эффекты, связанные с ионно-нейтральными столкновениями, проявляют себя наиболее ярко. Усиление быстрой волны становится возможным только в слабых магнитных полях (альфвеновская скорость меньше скорости звука), а медленной волны – в сильных (альфвеновская скорость больше скорости звука) с ограничением на диапазон углов усиления. При дальнейшем уменьшении степени ионизации наблюдается переход к гидродинамике: одна из магнитоакустических мод полностью затухает, а другая затухает лишь в низкочастотном пределе ($\omega \sim \omega_{col} < \omega_Q$) и усиливается на частотах $\omega \sim \omega_Q$, связанных с источником тепловыделения.

Работа частично поддержана министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект №АААА-А19-119083090053-9) и грантом РФФИ в рамках научного проекта №18-32-00344.

1. Zaqarashvili T., Khodachenko M., Rucker H. // A&A 2011. V. **529**. P. A82.
2. Soler R., Carbonell M., Ballester J.L. // ApJ Suppl. Series 2013. V. **209** (1). P. 16
3. Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Molevich N.E., Ryashchikov D.S. // PoP 2019. V. **26** (8). P. 082113.
4. Field G.B. // The Astrophysical Journal 1965. V. **142**. P. 531-567.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ С ПРОДОЛЬНОМ ТОКОМ И ПОТОКАМИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ, НА КРУПНОМАСШТАБНОМ ПЛАЗМЕННОМ СТЕНДЕ "КРОТ"

Гущин М.Е., Зудин И.Ю., Стриковский А.В., Коробков С.В., Айдакина Н.А., Гундорин В.И., Лоскутов К.Н.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mguschin@ipfran.ru

Понимание взаимосвязей процессов генерации волн и потоков ускоренных частиц в околоземной плазме крайне важно для объяснения многочисленных наблюдательных фактов, прогноза электромагнитной обстановки в ионосфере и магнитосфере, оценки энергетического баланса в различных областях космического пространства, а также для решения таких сугубо практических задач как, например, защита бортовой электроники ИСЗ от космической радиации. С точки зрения генерации шумов, наиболее тяжелые условия реализуются в авроральных широтах, характеризующихся высоким уровнем плазменных возмущений, наличием интенсивных продольных электрических полей и развитой токовой системой, включающей потоки высыпающихся «горячих» магнитосферных частиц и восходящие потоки «холодных» частиц ионосферы. Близкие явления могут развиваться в хвосте магнитосферы, в области токового слоя, которая также характеризуется интенсивными продольными полями и потоками заряженных частиц.

Крупномасштабный стенд «Крот», являющийся крупнейшей плазменной установкой России, позволяет моделировать эффекты взаимодействия потоков заряженных частиц с квазиоднородной замагниченной фоновой плазмой в условиях, приближенных к ионосферным и магнитосферным условиям. В докладе представлены результаты модельных экспериментов, выполненных в 2018-2019 годах с различными схемами создания надтепловой популяции электронов и генерации продольных токов, включая ускорение частиц фоновой плазмы с помощью коллектора под высоким положительным потенциалом, а также использование внешнего источника электронов – широкоапертурного термокатода. Свойства генерируемых широкополосных сигналов обладают свойствами, зависящими от параметров плазмы, соотношения локальной электронной плазменной и электронной циклотронной частот, наличия неоднородного профиля плотности замагниченной плазмы. Полученные результаты сопоставляются с данными других научных групп, работающих в области моделирования физических явлений в околоземной плазме.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 18-02-00622-а.

Особенности распространения свистовых волн вдоль систем неоднородностей с повышенной либо пониженной концентрацией.

Зудин И.Ю.¹, Заборонкова Т.М.², Айдакина Н.А.¹, Гушин М.Е.¹, Коробков С.В.¹

¹ИПФ РАН, гор. Нижний Новгород

²НГТУ им. Р.Е. Алексеева, гор. Нижний Новгород

Установлено, что системы неоднородностей концентрации околосредней плазмы, формирующиеся в результате её ВЧ нагрева, могут выступать в качестве специфических плазменных волноводов, способствующих проникновению излучения СДВ диапазона сквозь ионосферу [1,2]. Модельные расчеты продемонстрировали существование специфических режимов распространения низкочастотного излучения вдоль систем неоднородностей с пониженной [3] и повышенной концентрацией [4]. Расчеты позволили выделить несколько режимов распространения излучения, реализация которых зависит от характерного поперечного размера неоднородностей, расстояния между ними и их глубины.

Настоящий доклад посвящен обобщению и анализу результатов численного моделирования. Производится сопоставление волноводных свойств отдельных неоднородностей и их систем, рассматриваются и сравниваются между собой случаи неоднородностей с повышенной и пониженной концентрацией, двумерной и трехмерной постановки задачи. Анализ свойств отдельных неоднородностей выполнен на основе аналитических расчетов, выполненных для характерных условий ионосферных экспериментов.

Показано, что ключевой параметр, определяющий режим распространения волн вдоль системы неоднородностей – отношение поперечного размера неоднородностей к масштабу локализации полей мод неоднородностей взятых по отдельности [4], может существенно отличаться в случаях неоднородностей с повышенной и пониженной концентрацией при прочих равных условиях, что обуславливает разницу в характере распространения волн вдоль систем таких неоднородностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-32-00721 мол_a)

1. Vartanyan A., Milikh G.M., Mishin E., et. al. Artificial ducts caused by HF heating of the ionosphere by HAARP. J. Geophys. Res., 117, A10307 (2012)
2. Rapoport V.O., Frolov V.L., Polyakov S.V., et. al. VLF electromagnetic field structures in ionosphere disturbed by Sura RF heating facility. J. Geophys. Res., 115, A10322 (2010)
3. Зудин И.Ю., Айдакина Н.А., Гушин М.Е. и др. Численное моделирование волн свистового диапазона в замагниченной плазме с мелкомасштабными неоднородностями. Физика плазмы, т. 43, №12, стр. 1018-1028 (2018)
4. Zudin I.Yu., Zaboronkova T.M., Gushchin M.E. et. al. Whistler waves' propagation in plasmas with systems of small-scale density irregularities: Numerical simulations and theory. J. Geophys. Res.: Space Physics, 126, Issue 6, pp. 4739-4760 (2019)

РЕЗОНАНСНАЯ ЗАКАЧКА ЭНЕРГИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СГУСТКОВ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В СИЛОВУЮ ТРУБКУ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ

**Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Бояринцев Э.Л., Захаров Ю.П., Мирошниченко И.Б.,
Посух В.Г., Чибранов А.А., Шайхисламов И.Ф.**

ИЛФ СО РАН, НГТУ, г. Новосибирск, Россия, tvn25@ngs.ru

Впервые исследуется резонансное взаимодействие периодических сгустков лазерной плазмы с замагниченной лабораторной и космической плазмой. Методы исследований – эксперименты на стенде КИ-1 и расчеты на суперкомпьютерах. Большая энергоемкость сгустков и локализация волн в магнитной силовой трубке позволяют создавать интенсивные, длительные квазистационарные волны (КВ), которые переносят энергию в виде продольного импульса сжатой плазмы, момента импульса вращающейся плазмы фона, магнитных полей волн и низкочастотного электромагнитного излучения. Предложены безразмерные критерии резонансов, при выполнении которых в силовую трубку закачивается $\sim 50 \div 70$ % энергии сгустков. Критерии позволяют управлять режимами генерации следующих типов волн: поток плазмы сгустков или поток + альфвеновская волна или поток + альфвеновская волна + медленная магнитозвуковая волна или низкочастотное электромагнитное излучение с уникальным спектром (низкие и высокие частоты). КВ могут формироваться сгустками природного или искусственного происхождения. Критерии позволяют масштабировать результаты расчетов и лабораторных экспериментов на условия в космосе. Доказана применимость сгустков лазерной плазмы и взрывных генераторов плазмы (эксперимент Флаккус) для генерации КВ в широком диапазоне высот.

ОНЧ ШУМОВАЯ БУРЯ: АНАЛИЗ ОДНОГО ИЗ СОБЫТИЙ

**Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Федоренко Ю.В., Громова Л.И., Никитенко А.С.,
Лебедь О.М., Турунен Т.**

ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия; обс. Соданкюля, Финляндия;

ПГИ, г. Апатиты, ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия
kleimen@ifz.ru

Ранее в ряде работ Е.А. Пономарева и Е.Ф. Вершинина был выделен особый тип длительных дневных всплесков ОНЧ шумовых излучений, наблюдаемых субавроральных широтах в главную фазу магнитной бури. Такие излучения были названы «ОНЧ шумовыми бурями». Однако наши исследования в авроральных широтах показали, что такие излучения могут наблюдаться не только в главную, но и в восстановительную фазу магнитной бури в условиях практически спокойной космической погоды. Детально анализируется одно из таких событий, а именно, дневной 7-ми часовой всплеск ОНЧ хисса (ОНЧ шумовая буря), зарегистрированный 5 января 2015 г. одновременно на двух авроральных станциях, расположенных на широте $\sim 64^\circ$ MLAT, и разнесенных по долготе на ~ 400 км: финской станции Каннуслахто (КАН) и российской обсерватории Ловозеро (ЛОВ). Рассматриваются особенности динамического спектра ОНЧ волн разных временных масштабов. Показано, что в ходе развития обсуждаемого дневного ОНЧ всплеска, шумовые излучения на частотах ниже 3.5 кГц со временем переходит в периодические (QP) с квази-повторением ~ 3 с. Анализ направлений прихода отдельных коротких изолированных высокочастотных (выше 5 кГц) ОНЧ сигналов («птичек») в КАН и ЛОВ позволил установить возможное расположение области выхода этих волн из ионосферы.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий ИФЗ РАН, ПГИ, ИЗМИРАН.

ВЫСОКОШИРОТНЫЕ НАЗЕМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕГО ПРОХОЖДЕНИЯ К ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

**Никитенко А.С.¹, Лебедь О.М.¹, Федоренко Ю.В.¹, Маннинен Ю.², Клейменова Н.Г.^{3,4},
Громова Л.И.⁵**

¹ПГИ, г. Анапаты, Россия;

²Sodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, Finland;

³ИФЗ РАН, г. Москва, Россия;

⁴ИКИ РАН, г. Москва, Россия;

⁵ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия

alex.nikitenko91@gmail.com

Представлены результаты одновременной наземной регистрации ОНЧ аврорального хисса в пространственно разнесенных точках. Две точки регистрации расположены в авроральной зоне — obs. Каннуслахто (Финляндия) и obs. Ловозеро (Россия). Третья точка расположена в области полярной шапки на архипелаге Шпицберген в obs. Баренцбург (Россия). Результаты наблюдений показали, что область выхода ОНЧ аврорального хисса ограничена по широте. В рассматриваемых примерах выделено два случая: 1) излучения наблюдаются только в авроральной зоне (Каннуслахто и obs. Ловозеро) 2) излучения наблюдаются только в области полярной шапки (obs. Баренцбург). Для объяснения наблюдаемых результатов проведено численное моделирование распространения аврорального хисса в плоско-слоистой среде от области генерации до земной поверхности. Предложен возможный вариант объяснения наблюдаемого пространственного ограничения области выхода ОНЧ аврорального хисса.

НАБЛЮДЕНИЯ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ НА ЗЕМЛЕ И НА СПУТНИКАХ VAN ALLEN PROBES, ЛОКАЛИЗАЦИЯ ОБЛАСТЕЙ ИХ ГЕНЕРАЦИИ И ВЫХОДА К ЗЕМЛЕ

**Титова Е.Е.¹, Демехов А.Г.^{2,1}, Любич А.А.¹, Маннинен Ю.³, Пасманик Д.Л.²,
Никитенко А.С.¹, Ларченко А.В.¹**

¹ ПГИ РАН, г. Апатиты, Россия, lena.titova@gmail.com

² ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия.

³ Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия

Одновременные наблюдения ОНЧ излучений на Земле и на спутниках Van Allen Probes в экваториальной области магнитосферы были использованы для локализации источников квазипериодических (QP) ОНЧ излучений в магнитосфере. Наземные наблюдения ОНЧ излучений проводились на авроральных станциях Каннуслахто (67.74°N, 26.27°E) и Ловозеро (67.97°N, 35.02°E).

На двадцати пролетах спутников Van Allen Probes найдено взаимно однозначное соответствие между QP элементами, наблюдаемыми на Земле и на спутниках. Соответствие QP элементов регистрировалось на расстояниях до 3000 км от станций наблюдения до геомагнитной проекции положения спутника на Землю в широком диапазоне L оболочек ($L = 2 - 6$).

Для локализации областей источников QP излучений были использованы многокомпонентные измерения на спутниках Van Allen Probes, позволяющие определять вектора Пойнтинга и углы волновых нормалей, а также результаты расчетов локальных инкрементов свистовых волн, выполненные по измерениям параметров холодной и горячей плазмы на спутниках Van Allen Probes.

Вдоль траекторий спутников были выделены участки исходя из следующих условий: (а) вектор Пойнтинга QP излучений направлен от экватора, (б) угол между волновым вектором и магнитным полем был мал ($< 20^\circ$), (в) полоса частот с положительным инкрементом соответствовала полосе частот наблюдаемых QP излучений. Как оказалось, они составляли малую часть траекторий и имели характерные размеры $\Delta L \approx 0.1 - 0.3$. Эти локализованные области располагались на $L = 4 - 6$, и мы предполагаем, что они могут соответствовать прохождению спутника через области источников QP излучений. В ряде случаев эти локализованные области возможных источников QP излучений были связаны с неоднородностями концентрации, которые способны обеспечивать каналированное распространение ОНЧ волн в магнитосфере и их выход к Земле. Направления распространения QP эмиссий, определенные из многокомпонентных измерений на земной поверхности, используются для локализации областей их источников в магнитосфере.

ИСТОЧНИКИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1 ВО ВРЕМЯ СОБЫТИЯ 11 СЕНТЯБРЯ 2017 Г.

А.Г. Яхнин¹, Т.А. Яхнина¹, Т. Райта², Ю. Маннинен²

¹ Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия, ayahnin@gmail.com

² Геофизическая обсерватория Соданкюля, Соданкюля, Финляндия

В интервале 00-07 UT 11 сентября 2017 г. на сети финских индукционных магнитометров наблюдалась довольно сложная структура и динамика спектра пульсаций в диапазоне Pc1. Эти пульсации были зарегистрированы на поздней стадии восстановления магнитной бури, имевшей место 7-8 сентября 2017 г. (минимум Dst $\sim$ -125 нТл). С 01 до 03 UT в спектре пульсаций выделяются две полосы со средними частотами около 1.5 и 2.5 Гц. К 03 UT эти полосы сливаются. С 03 до 05 UT наблюдается “однополосное” излучение с меняющейся средней частотой. После 05 UT вновь наблюдаются две полосы, соответственно, с уменьшающейся и растущей частотой. Мы сопоставили особенности спектра пульсаций с динамикой локализованных высыпаний энергичных протонов, которые, как следует из наших предыдущих работ, являются индикатором источников ЭМИЦ волн. Данные о высыпаниях частиц получены на низкоорбитальных спутниках POES (NOAA, MetOp). До $\sim$ 03 UT вблизи наземных станций, регистрирующих пульсации в раннем утреннем секторе (01-06 MLT), наблюдались две группы источников на $L \sim 3$ и $L \sim 4$. Сравнение экваториальной гирочастоты ионов гелия f_{He^+} для L-оболочек этих источников с частотой пульсаций показало, что две основные наблюдавшиеся эмиссии Pc1 относятся к гелиевой полосе ($f < f_{He^+}$). Это указывает на то, что источники этих пульсаций располагаются в областях с повышенной концентрацией холодной плазмосферной плазмы. Действительно, результаты моделирования плазмосферы для рассматриваемого случая, представленные на сайте <http://enarc.space.swri.edu>, показали наличие плазмопаузы на $L \sim 3$ и дополнительной плазменной структуры на $L \sim 4$. К 03 UT источники двухполосных пульсаций сблизились, что привело к упомянутому выше «слиянию» полос. Две области источников ЭМИЦ волн, связанные с пространственно разделенными плазмосферными структурами, имеют существенную долготную протяженность. Это подтверждается наблюдениями двух областей ЭМИЦ волн и градиентов холодной плазмы на спутниках Van Allen Probes в секторе 8-10 MLT. Высыпания энергичных протонов после 03 UT, наблюдались как внутри, так и вне плазмопаузы. Это позволяет интерпретировать некоторые элементы в спектре пульсаций, связанные с источниками за плазмопаузой, как излучения, соответствующие водородной полосе ($f_{He^+} < f < f_{H^+}$). Наш анализ показывает важность использования информации об источниках, которую предоставляют данные о протонных высыпаниях, для интерпретации структуры и динамики спектров Pc1.

ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕ СВЯЗАННЫХ С ГЕОМАГНИТНЫМИ ПУЛЬСАЦИЯМИ КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЙ

Беспалов П.А.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, peter@appl.sci-nnov.ru

Динамика циклотронной неустойчивости в плазменном магнитосферном мазере описывается в рамках самосогласованной системы усредненных квазилинейных уравнений. В этой системе учитывается как диффузия энергичных электронов в пространстве адиабатических инвариантов, так и изменение интенсивности ОНЧ излучений. Стационарное состояние, отвечающее балансу между поступлением энергичных электронов от источника и их высыпанием в ионосферу, неустойчиво при определенной угловой зависимости мощности источника частиц. Мы рассматриваем нелинейные нестационарные процессы в радиационных поясах Земли, представляющие собой чередующиеся стадии накопления частиц в магнитной ловушке и их высыпания в ионосферу во время импульсов электромагнитного излучения. Особое внимание уделяется определению характеристик периодических ОНЧ излучений. Полученные результаты важны для интерпретации свойств квазипериодических ОНЧ излучений, не связанных с геомагнитными пульсациями. Как известно, такие излучения с периодами повторения спектральных форм от 10 до 300 секунд типичны для дневной субавроральной магнитосферы. Характеристики указанных излучений полезны для диагностики состояния магнитосферы.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 0035-2014-0029, при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-02-00206-а,

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПОТОКА ЭНЕРГИИ В ХОРОВЫХ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯХ В ОБЛАСТИ ИСТОЧНИКА: СОПОСТАВЛЕНИЕ НАБЛЮДЕНИЙ THEMIS И РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Демехов А.Г.,^{1,2} Таубеншус У.,³ Ганзелка М.,^{3,4} Сантолик О.^{3,4}

¹ ПГИ, г. Анатиты, Россия

² ИПФ РАН, г. Н.Новгород, Россия, andrei@ipfran.ru

³ Department of Space Physics, Inst. Atmospher. Phys., Czech Acad. Sci., Prague, Czechia

⁴ Faculty of Mathematics and Physics, Charles University in Prague, Czechia

Обсуждаются результаты наблюдений хоровых ОНЧ излучений в области генерации по данным спутников THEMIS. С использованием многокомпонентных данных о волновом поле хоровых излучений, распространяющихся квазипродольно по отношению к геомагнитному полю и зарегистрированных на некотором расстоянии от минимума магнитного поля (геомагнитного экватора) найдено, что хоровые элементы с направлением распространения в сторону экватора имеют систематический сдвиг частоты вверх и меньшую амплитуду по сравнению с одновременно наблюдаемыми элементами, распространяющимися от экватора. Эта особенность зарегистрирована в отдельных событиях и подтверждена статистически. Наблюдаемые инкременты хоровых элементов, распространяющихся в обоих направлениях, имели близкие величины.

Аналогичная особенность продемонстрирована и в результатах самосогласованных численных расчетов, проведенных с использованием модели лампы обратной волны для генерации хоровых излучений. Предложено качественное объяснение найденной закономерности, основанное на нелинейной пространственно-временной эволюции функции распределения энергичных электронов в процессе генерации волн. При движении электронов от экватора их продольная скорость уменьшается как за счет нелинейного взаимодействия с волнами, так и за счет силы адиабатического торможения в неоднородном магнитном поле. Соответственно частота хоровых элементов, генерируемых такими электронами и распространяющихся по направлению к экватору, выше частоты элементов, распространяющихся в противоположном направлении.

УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ПРИ РЕЗОНАНСНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С АВРОРАЛЬНЫМ КИЛОМЕТРОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Грач В.С.¹, Демехов А.Г.^{2,1}

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, vsgrach@ipfran.ru

²ПГИ, г. Анапты, Россия

В работе анализируется резонансное взаимодействие энергичных электронов с авроральным километровым радиоизлучением (АКР). Согласно спутниковым наблюдениям [1,2]. АКР имеет частоту от десятков до сотен килогерц, что близко к локальной гирочастоте в области генерации; генерируется в областях с пониженной электронной концентрацией; как правило, представляет собой быструю необыкновенную волну (Х-моду). Анализ спутниковых наблюдений [3] также показывает возможность наличия тонкой структуры АКР в виде квазимонохроматических всплесков, структур с дрейфом частоты от сотен герц до десятков килогерц в секунду и др. В данной работе на основе численного решения уравнений движения частиц в заданном поле квазимонохроматического волнового пакета АКР исследуются возможные режимы циклотронного резонансного взаимодействия и анализируется возможность ускорения частиц в результате этого взаимодействия.

Рассматривались следующие параметры плазмы и волновых пакетов: концентрация плазмы $N_e=1 \text{ см}^{-3}$, высоты $(13-17) \cdot 10^3 \text{ км}$, L -оболочка $L=8,55$, частота пакета 55 кГц , два значения угла волновой нормали χ (25° и 60°) и два значения амплитуды — $0,2$ и $0,4 \text{ В/м}$ (такие амплитуды соответствуют наблюдаемым величинам). Эволюция пакета учитывалась при расчетах.

При реалистичных значениях амплитуды волны взаимодействие может быть существенно нелинейным. Диапазон резонансных энергий при $\chi=60^\circ$ составляет примерно $10-120 \text{ кэВ}$, при $\chi=25^\circ$ — $1-1500 \text{ кэВ}$. При этом эффективное взаимодействие возможно только в диапазоне начальных энергий $5-100 \text{ кэВ}$.

Отличительной особенностью резонансного взаимодействия является немонотонная высотная зависимость отстройки от резонанса, вследствие чего имеются две точки резонанса, характерное расстояние между которыми по высоте составляет от нуля (слияние этих точек) до $500-4000 \text{ км}$. Важно, что знаки эффективной неоднородности, определяющие направление изменения энергии частицы в случае ее нелинейного захвата полем волны, в этих точках противоположны. Поэтому в условиях достаточно сильной нелинейности имеет место компенсация эффектов ускорения/торможения в двух областях резонанса. Наибольшее ускорение электронов реализуется в случае относительно слабой нелинейности, когда частиц, захваченных полем волны, немного или они отсутствуют. При этом усредненное по фазам изменение энергии может достигать 150% для частиц с энергиями $7-30 \text{ кэВ}$. Энергия частиц с более высокими начальными энергиями ($30-100 \text{ кэВ}$) уменьшается примерно на 10% . Небольшая доля частиц с энергиями $10-100 \text{ кэВ}$ в результате взаимодействия попадает в конус потерь.

1. Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г., Сазонов Ю. А., Тарасов А. Ф. // Косм. иссл. 1965. V. 3. P. 614
2. Calvert W. // Geophys. Res. Lett. 1981. V. 8. P. 919
3. Menietti J. D., Persoon A. M., Pickett J. S., Gurnett D. A. // JGR. Space Physics. 2000. V. 105. P. 18.

ВЕТВИ РЕЗОНАНСНОГО УНЧ ПОГЛОЩЕНИЯ ВО ВНЕШНЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ

Бадин В.И.

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

Высокоширотные доплеровские радарные наблюдения позволяют определять скорость поперечного дрейфа электронов или 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. Резонансные колебания магнитных силовых линий формируют континуум собственных частот, в котором возможно определить нижнюю частотную границу континуума, соответствующую наиболее длинным силовым линиям (на дневной стороне магнитосферы). 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.

В ходе обработки данных радарного мониторинга были обнаружены значительные расхождения (50% и более по относительной величине) между минимальными резонансными частотами, найденными для различных лучей радара, и некоторая неустойчивость задачи о минимуме функционала. В то же время, с математической точки зрения минимальные задачи в методе наименьших квадратов обычно считаются устойчивыми. Было предположено, что большой разброс значений и неустойчивость задачи физически обусловлены существованием более чем одной ветви резонансного УНЧ поглощения.

Посредством последовательного сужения спектрального окна, в котором решается задача о минимуме функционала метода наименьших квадратов, удалось выделить высокочастотную и низкочастотную ветви резонансного УНЧ поглощения. С точки зрения теории резонансов магнитных силовых линий, высокочастотная и низкочастотная ветви могут соответствовать полуволновым и четвертьволновым колебаниям, возбуждаемым при различных соотношениях между волновой проводимостью магнитосферы и педерсеновской проводимостью ионосферы. При этом интенсивность поглощения, оцениваемая по глубине падения УНЧ сигнала, определяется количеством магнитных силовых линий, на которых возбуждаются те или иные колебания (объемом магнитосферной плазмы, в котором возбуждается та или иная мода колебаний).

Анализ доплеровских радарных данных позволил установить минимальные частоты и сравнительную интенсивность высокочастотной и низкочастотной ветвей резонансного УНЧ поглощения в зависимости от направления вектора межпланетного магнитного поля и величины динамического давления солнечного ветра. В частности оказалось, что перед сильной магнитной бурей доминировало поглощение в низкочастотной ветви, что приводило к низким значениям минимальной частоты наиболее интенсивного резонансного поглощения. При других условиях в солнечном ветре, доминировало поглощение в высокочастотной ветви. Выделение высокочастотной и низкочастотной ветвей резонансного УНЧ поглощения в наблюдательных данных обеспечивает последовательную интерпретацию полученных результатов и уменьшает их разброс между лучами радара.

УШИРЕНИЕ СПЕКТРОВ СИГНАЛОВ СДВ-СТАНЦИЙ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Михайлов Ю.М., Капустина О.В., Соболев Я.П.

ИЗМИРАН, yumikh@izmiran.ru

Представлены результаты регистрации уширения спектров сигналов СДВ-передатчиков в космической плазме. Предполагается, что этот широко наблюдаемый эффект обусловлен взаимодействием свистовых модов излучений с мелкомасштабными изменениями концентрации электронов. В работе [1] показано, что он является следствием межволнового взаимодействия, которое классифицировано в этой работе, как взаимодействие волн с детерминированной и случайной фазой, или как нелинейная связь двух и более волн с существенной разницей по частоте и амплитуде. В качестве примеров приводятся несколько эффектов. На спутнике ИК-25 наблюдалось уширение спектра сигнала наземного передатчика на частоте 16.2 кГц при взаимодействии с близким по частоте другим наземным передатчиком на частоте 10.2 кГц. При пролете субспутника Магион-3 над Средиземноморьем обнаружено взаимодействие сигналов нескольких передатчиков и НГР-шумов. На спутнике ИК-24 была замечена трансформация спектра сигнала передатчика на частоте 16.2 кГц при взаимодействии с КНЧ-шумами в полосе частот вблизи 3 кГц.

Литература

1. Trachtengerts V.Yu., M. Hayakawa. A wave-wave interaction in whistler frequency range in Space Plasma. JGR. V.98. No. A11. P. 19205-19207. 1993.

ДИНАМИКА СОЛИТОНОВ ОБОБЩЕННОГО УРАВНЕНИЯ NLS В НЕОДНОРОДНОЙ И НЕСТАЦИОНАРНОЙ СРЕДЕ: ЭВОЛЮЦИЯ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

Белашов В.Ю., Харшиладзе О.А., Белашова Е.С.

КФУ, г. Казань, Россия, vybelashov@yahoo.com

Обобщенное 3-мерное (3D) нелинейное уравнение Шредингера (3-GNLS) [1]

$$\partial_t u + i\gamma |u|^2 u - i\beta \partial_x^2 u + (\alpha/2)u = \sigma \int_{-\infty}^x \Delta_{\perp} u \, dx + f'$$

(где $\alpha, \beta, \gamma = \varphi(t, x, y, z)$, $f' = f'(t, x, y, z)$, и $(\alpha/2)u$ – диссипативный член, а u – огибающая волнового пакета) 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) и нелинейной оптике (распространение световых импульсов в кристаллах, оптоволокне и плоских оптических волноводах). Оно описывает также такие явления, как турбулентность, волновой коллапс и оптическая самофокусировка. Уравнение 3-GNLS 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, впервые введенного ими в 1950 г. при описании сверхпроводимости), гравитационные волны малой амплитуды на поверхности глубокой невязкой жидкости и др. Отметим, что 3-мерное уравнение 3-GNLS 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 [2, 3] для других уравнений (GKP и 3-DNLS) системы ВК (Belashov-Karpman system [2]), мы можем аналитически исследовать устойчивость возможных решений уравнения 3-GNLS, а динамику взаимодействия солитонов изучить численно. В настоящей работе и реализуется такой подход.

Аналитически получены условия устойчивости солитоноподобных решений уравнения GNLS и численно изучены случаи устойчивой и неустойчивой (с образованием бризеров) эволюции импульсов различной формы, а также взаимодействие 2- и 3-импульсных структур, приводящее к формированию устойчивых и неустойчивых решений.

Полученные результаты могут быть полезны в многочисленных приложениях в физике плазмы, 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., Kharshiladze O.A., Rogava J. // J. Astrophys. Aerosp. Tech. 2018. V. **6**. P. 38.
2. Belashov V.Yu., Vladimirov S.V. Solitary Waves in Dispersive Complex Media. Theory, Simulation, Applications. Springer-Verlag. 2005. 303 p.
3. Belashov V.Yu., Belashova E.S., Kharshiladze O.A. // Adv. Space Res. 2018. V. **62**. P. 65.

ОСОБЕННОСТИ ОТРАЖЕНИЯ СВИСТОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН, ПАДАЮЩИХ НА ИОНОСФЕРУ СВЕРХУ, В ДНЕВНЫХ И НОЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Мизонова В.Г., Беспалов П.А.

НГТУ, г. Нижний Новгород, Россия, vermiz@mail.ru

Проанализированы результаты численного решения полевых уравнений для свистовых электромагнитных волн, падающих на ионосферу сверху. Для расчетов полей на сравнительно больших высотах (от 150-200 км до 800 км) использован матричный алгоритм приближенного решения полевых уравнений в плоскостной плавно неоднородной среде. Суть алгоритма заключается в последовательном нахождении обусловленных неоднородностью среды уточняющих поправок к локальным корням дисперсионного соотношения и локальным векторам поляризации [1]. Для вычисления полей на высотах ниже 150-200 км, где свойства среды изменяются резко, происходит трансформация свистовых волн в вакуумные электромагнитные, и приближенные методы неприменимы, использован метод коллокаций решения граничной задачи [2]. Комбинация двух указанных подходов позволяет учесть реальные высотные зависимости ионосферных параметров и избежать проблемы расходимости решений на больших высотах, связанной с высокими декрементами нераспространяющихся мод [3].

Полученные результаты использованы для определения коэффициента отражения R сверху по энергии свистовых волн. Проанализированы зависимости коэффициентов отражения от частоты и угла падения волны для различных широт, времени суток и времени года. В ночных условиях для волн с частотами от 1 кГц до 10 кГц значения R обычно лежат в пределах от 0.3 до 0.8. В дневных условиях значения R в среднем на два порядка ниже и не превышают величины 0.01. Значения коэффициентов отражения могут существенно зависеть от угла падения волны. Наименьшие значения коэффициента отражения отвечают волнам, отражение которых происходит в области сильного затухания (90-110 км). Полученные результаты объясняют особенности условий возбуждения плазменного магнитосферного мазера.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-02-00206-а.

1. Мизонова В.Г. // Физика Плазмы. 2019. Т. 45. С. 1.
2. Беспалов П.А., Мизонова В.Г. // Космические Исследования. 2018. Т. 56. № 1. Р. 33.
3. Bespalov P.A., Mizonova V.G., Savina O.N. // JASTP. 2018. V. 175. P. 40.

ОСОБЕННОСТИ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ СНЧ/ОНЧ СИГНАЛА ИОНОСФЕРНОГО ИСТОЧНИКА В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ПО НАГРЕВУ ИОНОСФЕРЫ МОДУЛИРОВАННЫМ КВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ

Ларченко А.В., Федоренко Ю.В., Лебедь О.М.

ПГИ РАН, г. Апатиты, Россия, alexey.larchenko@gmail.com

В докладе рассматриваются результаты наблюдений на высокоширотной сети станций ПГИ: Лотта, обс. Верхнетуломский, обс. Ловозеро и обс. Баренцбург (арх. Шпицберген), СНЧ/ОНЧ сигналов низкочастотного ионосферного источника в нагревном эксперименте, проведенном ААНИИ на стенде «EISCAT/Heating» (г. Тромсе). В результате анализа данных было обнаружено, что на частотах близких к частоте первого поперечного резонанса волновода Земля-ионосфера (~ 1.8 кГц) амплитуда горизонтального магнитного поля ионосферного источника в обс. Баренцбург, расположенной в 946 км от нагревного стенда, зачастую превышала амплитуды на более близко расположенных к стенду материковых станциях (самая ближняя станция – Лотта – 395 км). При этом на частотах, далеких от частоты первого поперечного резонанса, при прочих равных условиях такого эффекта не наблюдалось. Выделены и проанализированы два возможных механизма генерации и распространения низкочастотных волн в волноводе Земля-ионосфера, вероятно, ответственных за наблюдаемый эффект. Первый связан с достаточно малым затуханием волн с частотами, близкими к частоте первого поперечного резонанса волновода Земля-ионосфера, при распространении над высокопроводящей морской поверхностью с высоким коэффициентом отражения. Второй связан с особенностями диаграммы излучения ионосферного источника. Для объяснения наблюдаемого эффекта проведено численное моделирование процессов генерации и распространения СНЧ/ОНЧ волн в волноводе Земля-ионосфера и оценен вклад предложенных механизмов.

ОТРАЖЕНИЕ ОТ ИОНОСФЕРЫ И ВЫХОД НА ЗЕМЛЮ ПАКЕТОВ СВИСТОВЫХ ВОЛН: ДИНАМИЧЕСКАЯ 2D МОДЕЛЬ.

Д. Р. Шкляр, С.А. Прохоренко

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

Исследовано полное внутреннее отражение и выход на землю свистового волнового пакета, падающего на нижнюю границу ионосферы сверху. Трудности в понимании этого процесса были связаны с попытками описать его в терминах монохроматической волны с периодической структурой в одном направлении, в котором параметры среды не изменяются. В рамках этого подхода закон Снеллиуса запрещает выход волны на землю, если направление волнового вектора составляет не очень малый угол с вертикалью, что почти всегда так. Ясно, что ни одно из указанных выше предположений не выполняется в реальной ситуации. Во-первых, ни падающий волновой пакет, ни поле, возбуждаемое в волноводе Земля-ионосфера, не обладают вышеупомянутой структурой, т.е. не являются периодическими с постоянным волновым числом в направлении, вдоль которого параметры среды не изменяются. Во-вторых, данная проблема явно нестационарная - напротив, мы имеем дело с переходным явлением, в котором изменение структуры поля во времени является основным процессом. В настоящей работе мы отказались от обоих этих предположений и рассмотрели нестационарную двумерную задачу. Получено и решено численно уравнение для комплексного векторного потенциала волнового поля, которое описывает обсуждаемую проблему. Исследованы случаи вертикального и наклонного падения волнового пакета, с основным акцентом на случай наклонного падения, для которого стационарная одномерная модель предсказывает полное внутреннее отражение волны. Начальные условия для исследуемой задачи были приняты в виде пространственно-ограниченного двумерного волнового пакета с центральным волновым вектором k_0 , который отвечает частоте ω_0 согласно локальному дисперсионному соотношению для продольно распространяющихся низкочастотных свистовых волн. Основной результат настоящей работы состоит в том, что поле волнового пакета свистовых волн, падающего на ионосферу сверху, достигает земли даже в том случае, когда угол падения находится вне конуса прохождения. Как показали численные расчеты, ослабленное поле проходит область резкого падения плотности на нижней границе E -области ионосферы, достигает земли и затем многократно отражается от границы ионосферы и от земли, распространяясь в волноводе Земля-ионосфера. Сразу после того, как волновой пакет достигает границы ионосферы, поле в волноводе Земля-ионосфера имеет структуру, которая напоминает структуру сферической волны, возбуждаемой источником малого размера.

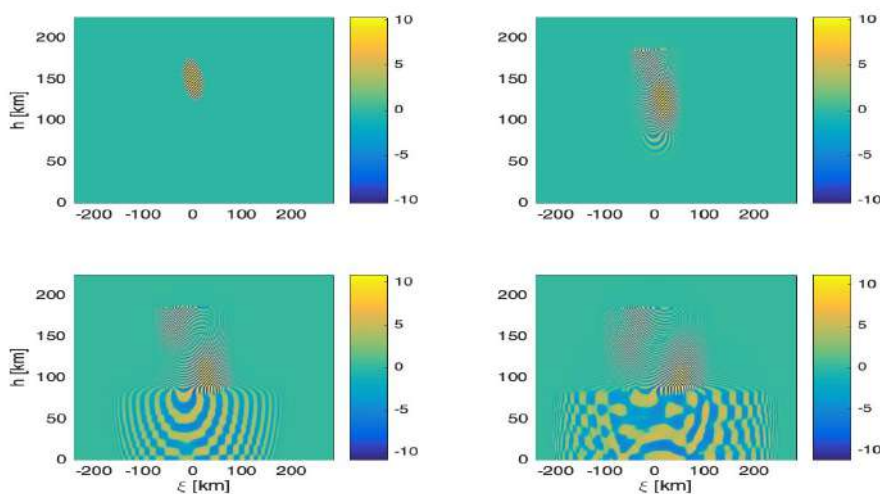


Рис. 1. Волновое поле в различные моменты времени (слева направо, сверху вниз): начальный волновой пакет, сразу после достижения нижней границы ионосферы, в момент достижения земли, распространение в волноводе Земля-ионосфера.

Нелинейные связи линейных и нелинейных резонансов во внешней магнитосфере и переход к турбулентности.

Савин С. П., Скальский А. А., Климов С. И., Лежен Л. А., Ноздрачев М. Н.

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

По данным ИНТЕРБОЛ-1, DOUBLE STAR, CLUSTER, GEOTAIL мы рассматриваем нелинейные 3х-волновые каскадные процессы, которые связывают линейные и нелинейные резонансы в магнитослое, на магнитопаузе, в волноводе внутри магнитосферного хвоста и вдоль силовых линий в ионосфере. Первоначально частоты (нас интересуют 0.015 – 20 мГц) резонансов в разных средах могут не совпадать. Но когда достигается нелинейный режим, генерируются нелинейные гармоники и каскады распадающихся волн. Это и создает связь между волнами от ударной волны до ближнего магнитосферного хвоста и полярной ионосферы. Эти нелинейные связи хорошо прослеживаются с помощью вэйвлетного би-спектрального анализа.

На частотах свыше 5 мГц в магнитослое с нелинейными колебаниями параметров резонансы перекрываются и сливаются в широко известный турбулентный спектр с наклоном $\sim \langle -1 \rangle$. Хотя и отдельные резонансы могут выделяться на фоне развитой турбулентности вплоть до ионно-циклотронных и нижнегибридных частот.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ВОЗМУЩЕНИЯ В ПЛАЗМЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТЕПЛОВОГО ДИСБАЛАНСА

Завершинский Д.И.^{1,2}, **Молевич Н.Е.**^{1,2}, **Рящиков Д.С.**^{1,2}, **Накаряков В.М.**^{3,4},
Колотков Д.Ю.^{4,5}

¹ Самарский университет, г. Самара, Россия, dimanzav@mail.ru

² СФ ФИАН, г. Самара, Россия

³ СПбФ САО РАН, г. Санкт Петербург, Россия,

⁴ University of Warwick, Coventry, UK

⁵ Институт солнечно-земной физики, СО РАН, г. Иркутск, Россия

Процессы нагрева и радиационного охлаждения играют существенную роль в динамике солнечной короны. Их отличительной особенностью является зависимость от параметров плазмы таких, например, как температура и плотность. В связи с этим, любое возмущение установившихся параметров среды может привести к нарушению теплового баланса, которое в свою очередь окажет влияние на развитие самого возмущения. Иными словами, имеет место положительная или отрицательная обратная связь между возмущением и средой.

Обратная связь, в полной мере определяется конкретным видом функций нагрева и радиационных потерь. И в различных областях значений параметров среды, одно и то же возмущение может вести себя качественно различным образом. Для того, чтобы описать как будет развиваться возмущение в подобных условиях, иначе говоря, при различных режимах теплового дисбаланса, нами было использовано дифференциальное уравнение, полученное на основе исходной системы МГД уравнений в приближении бесконечного магнитного поля. Для данного уравнения было найдено точное аналитическое решение задачи Коши для граничных условий Дирихле первого рода и Неймана второго рода. Полученное решение позволяет точно описывать эволюцию исходного возмущения произвольной природы происхождения (изобарическое, адиабатическое, и т.д.) до тех пор, пока сформированное возмущение существенно не выходит за рамки первого приближения теории возмущений.

Важно отметить, что наблюдаемое в итоге возмущение среды является результатом развития не только собственных мод медленного магнитозвукового типа, но также и энтропийной волны. Нами было показано, что динамика, как медленных магнитозвуковых мод, так и энтропийной волны, в первую очередь определяется величиной и отношением двух характерных временных масштабов, определяемых специфической формой радиационных потерь и нагрева. В ходе исследования была построена диаграмма, разделяющая области с различным поведением собственных мод. Разделение проводилось по принципу изменения зависимостей фазовой скорости и инкремента/декремента энтропийной и магнитозвуковых волн. Показано, что фазовая скорость магнитозвуковых мод, может существенно отличаться от общепринятого значения. В зависимости от номера гармоники (волнового числа) может, как монотонно расти, так и монотонно убывать к ненулевому пределу, определяемому отношением двух характерных временных масштабов. Также фазовая скорость может иметь экстремум и более того возможно существование области непропускания волн. В среде возможно как усиление, так и затухание магнитозвуковых мод и энтропийной волны. Их инкременты/декременты также зависят от номера гармоники. Величина инкрементов/декрементов и их зависимость от номера гармоники, как для магнитозвуковых мод, так и для энтропийной волны, однозначно определяется знаком и величиной ранее упомянутых характерных временных масштабов. Демонстрация различных режимов теплового дисбаланса в данной работе проводилась на основе анализа эволюции исходного гауссова возмущения.

Работа частично поддержана министерством науки и высшего образования РФ (проект №АААА-А19-119083090053-9) и грантом РФФИ в рамках научного проекта №18-32-00344.

САМОВОЗДЕЙСТВИЕ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ВЯЗКОЙ И КОНЕЧНО ПРОВОДЯЩЕЙ ПЛАЗМЕ С ДИСБАЛАНСОМ НАГРЕВА И ОХЛАЖДЕНИЯ

Белов С.А., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, mr_beloff@mail.ru

Одним из возможных механизмов нагрева солнечной плазмы до наблюдаемых температур является диссипация энергии линейно поляризованными альфвеновскими волнами большой амплитуды вследствие укручения их профиля и дальнейшего образования токовых слоев. Данное укручение вызвано самовоздействием альфвеновских волн, состоящим из двух этапов. На первом этапе альфвеновская волна с помощью пондеромоторной силы индуцирует продольное возмущение плазмы, распространяющееся с альфвеновской скоростью. На втором этапе данное возмущение взаимодействует с индуцировавшей его волной, приводя к изменению профиля последней. Подобное взаимодействие для линейно поляризованных альфвеновских волн описывается скалярным уравнением Козна-Кулсруда.

Стоит отметить, что неадиабатические процессы нагрева и радиационного охлаждения, присутствующие в солнечной плазме, способны значительно изменить динамику волн в рассматриваемых моделях. Так дисбаланс процессов нагрева и охлаждения может проявлять себя в качестве тепловых неустойчивостей: изохорической, изобарической, изоэнтропической. В частности, изоэнтропическая неустойчивость относится к волновому типу неустойчивостей и оказывает непосредственное влияние на моды акустического типа и, в частности, на магнитоакустические волны. Так в изоэнтропически неустойчивой среде магнитоакустические волны становятся неустойчивыми и могут усиливаться до больших амплитуд, в то время как альфвеновские волны остаются устойчивыми. Однако самовоздействие альфвеновских волн в изоэнтропически неустойчивой/устойчивой среде приводит к более быстрому/медленному укручению профиля волны, а также дополнительному увеличению/уменьшению амплитуды волны.

Рассмотрение распространения линейно поляризованных альфвеновских волн в вязкой и конечно проводящей плазме с дисбалансом нагрева и охлаждения приводит к интегро-дифференциальному уравнению, описывающему самовоздействие альфвеновских волн в данном типе сред. Полученное уравнение с большой вероятностью не имеет аналитического решения, однако для него можно найти характерные времена укручения и усиления/затухания. Расчет данных времен для параметров солнечной плазмы показывает, что дисбаланс нагрева и охлаждения может существенно влиять на самовоздействие альфвеновских волн в таких областях, как протуберанцы и солнечные пятна.

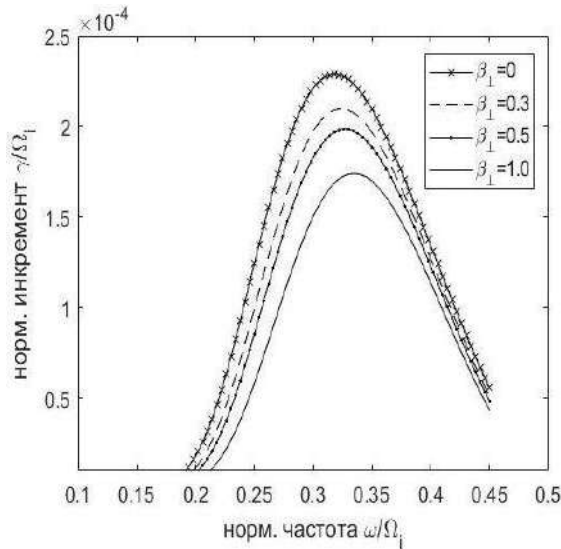
Работа частично поддержана министерством науки и высшего образования Российской Федерации (проект №АААА-А19-119083090053-9) и грантом РФФИ в рамках научного проекта №18-32-00344.

ВЛИЯНИЕ КОНЕЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ ГОРЯЧИХ ПРОТОНОВ НА ГЕНЕРАЦИЮ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫХ ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Фейгин Ф.З., Хабазин Ю.Г.

ИФЗ РАН, г.Москва, Россия, feygin@ifz.ru

Исследование влияния горячей анизотропной плазмы на развитие циклотронной неустойчивости ионно-циклотронных волн в магнитосфере Земли позволяет сделать вывод, что при конечных значениях плазменного давления $\beta_{\perp}$ модифицируется как мнимая часть



дисперсионного уравнения, связанная с усилением волн, так и реальная часть этого уравнения, связанная с распространением волн вдоль силовых линий. Это приводит как к изменению инкремента циклотронной неустойчивости, так и к вариации параметров распространения электромагнитных ионно-циклотронных (ЭМИЦ) волн вдоль силовой линии. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при генерации ЭМИЦ волн в околоземной плазме предпочтительны малые значения перпендикулярного плазменного давления протонов ($\beta_{\perp}$), большие значения анизотропии (A) и большие значения продольного плазменного давления этих частиц ($\beta_{\parallel}$).

При конечном давлении плазмы дисперсионное уравнение принимает вид:

$$k^2 F = \frac{x^2}{1-x} - i\sqrt{\pi} \frac{\beta_{\perp} \left(\frac{A}{A+1} - x \right) (1-x)^{5/2}}{\beta_{\parallel}^{3/2} k} \exp \left[-\frac{(1-x)^2}{\beta_{\parallel} k^2} \right], \quad (1)$$

$x = \omega / \Omega_i$ — нормированная частота, Ω_i — гирочастота ионов, $\beta_{\perp} = 8\pi n_{\perp} T_{\perp} / B_0^2$,

$\beta_{\parallel} = 8\pi n_{\parallel} T_{\parallel} / B_0^2$, $\tilde{A} = 1 - T_{\parallel} / T_{\perp}$, $k = ck_{\parallel} / \omega_{pi}$ — волновой вектор, нормированный на

ленгмюровскую частоту $\omega_{pi}^2 = 4\pi n_0 e^2 / m$, $F = 1 + \frac{1}{2} \beta_{\perp} \frac{(\tilde{A} - x)}{(1-x)^3}$.

Уравнение для реальной части частоты (с $\text{Im} k = 0$) имеет дополнительный множитель

$$k^2 F = \frac{x^2}{1-x}, \quad (2)$$

а нормированный инкремент принимает вид

$$y = \frac{\gamma}{\Omega_i} = \sqrt{\pi} \frac{\beta_{\perp} (\tilde{A} - x) (1-x)^{5/2}}{\beta_{\parallel}^{3/2} x^2 (2-x)} F^{1/2} \left[1 - \frac{x(1-x)}{(2-x)} \frac{d \ln F}{dx} \right]^{-1} \exp \left[-\frac{(1-x)^3}{\beta_{\parallel} x^2} F \right]. \quad (3)$$

Работа выполнена при поддержке Проекта Минобрнауки КП19-270 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований» (Проект 28 П, 12) в рамках государственного задания института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИНФРАЗВУКОВЫХ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ПЛАЗМЕННЫЙ МАГНИТОСФЕРНЫЙ МАЗЕР

Беспалов П.А.¹, Савина О.Н.², Ашина П.Н.²

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, peter@appl.sci-nnov.ru

²НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия

Обсуждается возможность воздействия атмосферных инфразвуковых возмущений на коллективные процессы в электронных радиационных поясах. Воздействие происходит из-за модуляции коэффициента отражения ОНЧ волн от ионосферы сверху. Как известно, плазменный магнитосферный мазер (ПММ) в области радиационных поясов чувствителен даже к слабой модуляции добротности магнитосферного резонатора свистовых волн. Для условий в дневном секторе магнитосферы характерен режим осцилляций потоков волн и частиц в ПММ с периодами 10 - 300 секунд. Соответствующие периоды свойственны атмосферным инфразвуковым волнам. В работе проводится анализ параметров инфразвуковых колебаний в атмосфере с заданным высотным температурным профилем. В модельном расчете для атмосферы со скачком температуры установлена возможность существования на ионосферных высотах собственных колебаний с указанными периодами и горизонтальными масштабами порядка ста километров. В результате коэффициент отражения магнитосферных электромагнитных волн от областей ионосферы с инфразвуком испытывает модуляцию, величина которой достаточна для модификации режимов работы ПММ. Как показали результаты численных расчетов инфразвуковые волны могут формировать характерную пространственно-временную структуру интенсивности ОНЧ излучений и потоков энергичных электронов.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-02-00206-а.

ВОЛНОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ПРИПОВЕРХНОСТНОЙ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЕ ФОБОСА И ДЕЙМОСА

Т.И. Морозова, С.И. Копнин, С.И. Попель

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, timoroz@yandex.ru

Рассмотрено распространение линейных и нелинейных волн в пылевой плазме вблизи поверхностей Фобоса и Деймоса. Показано, что движение солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц приводит к анизотропии функции распределения электронов в пылевой плазме вблизи поверхностей марсианских спутников. Как следствие, могут развиваться неустойчивости и возбуждаться высокочастотные волн с частотами в диапазоне ленгмюровских и электромагнитных волн. Также возможно распространение пылевых звуковых волн, возбуждаемых в областях терминаторов марсианских спутников. Найдены решения в виде пылевых звуковых солитонов для параметров плазменно-пылевых систем над освещенными частями поверхностей Фобоса и Деймоса, определены области возможных чисел Маха и амплитуд солитонов. В преддверии будущих полетов на марсианские спутники важно исследовать эти процессы, поскольку волновые движения в приповерхностном слое над освещенными частями марсианских спутников могут влиять на работу оборудования посадочных модулей.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект No 18-02-00341-а), а также Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований”. Т.И. Морозова выражает благодарность Фонду развития теоретической физики и математики “Базис”.

ВОЛНОВЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ИОНОСФЕРЕ И ВНУТРЕННИХ ОБЛАСТЯХ МАГНИТОСФЕРЫ МАРСА: НАБЛЮДЕНИЯ НА КА ФОБОС-2

Куликов¹ С.В., Климов¹ С.И., Савин¹ С.П., Стяжкин² В.А., Скальский¹ А.А., Сантолик³ О., Соколова⁴ Е., Колмашова³ И.

¹ ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kulikov@rx24.ru;

² ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия;

³ IAP, г. Прага, Чехия;

⁴ ИФЗ РАН, г. Москва, Россия;

В 1989 году приборы PWS [1] и MAGMA [2], установленные на борту КА Фобос-2, производили измерения электрического и магнитного полей в магнитосфере Марса. Некоторые из обнаруженных в магнитосфере эмиссий могут быть связаны с процессами, происходящими в нижних слоях ионосферы Марса. Так волновая активность в хвосте магнитосферы была зафиксирована в области, интерпретированной в статье [3] как содержащая либо изолированные магнитные линии, либо линии, являющиеся внутренними линиями планеты, что в свою очередь может указывать на то, что эмиссии возникли в ионосфере Марса. Данный случай регистрации эмиссий отличается от типичных наблюдений волновых явлений вблизи области переворота Vx компоненты поля в хвосте Марса [4].

Также некоторые из эмиссий могут быть предварительно интерпретированы, как возникшие в ионосфере Марса вблизи границ магнитных аномалий. Во время пролета перицентра орбиты 8 февраля 1989 года прибор PWS на борту аппарата Фобос-2 зафиксировал серию эмиссий в ионосфере Марса. Сравнение данных PWS с картой магнитных аномалий [5], показало наличие связи между местами возникновения эмиссий и очагами аномальной намагниченности коры.

1. Grard R., Pedersen A., Klimov S., Savin S., Skalsky A., Trotignon J.G., Kennel C. // Nature V. **341**. 607.

2. Riedler W., et al. // Nature V. **341**. P. 604.

3. Dubinin E.M., Sauer K., Baumgartel K., Lundin R. // Adv. Space Res. V. **20**. No. 2. P. 149.

4. Nairn C.M.C., Grard R., Skalsky A., Trotignon J.G. // J. Geophys. Res. V. **96**. No. A7. P.11227.

5. Connerney J. E. P., et al. // Geophysical Research Letters V. **28**. P. 4015

ГЕНЕРАЦИЯ ВИСТЛЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ОБЛАКОМ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ЗАМАГНИЧЕННОМ ФОНЕ

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

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, a.berezuckiy@yandex.ru

В настоящей работе на экспериментальной установке КИ-1 ИЛФ СО РАН, с использованием лазерной плазмы, варьируя концентрацию, магнитное поле и тип фоновой плазмы, исследуются процессы генерации вистлерных возмущений. Параметры экспериментов выбраны с учетом численного моделирования с целью получения нелинейных вистлеров большой амплитуды в широком диапазоне частот. В расчетах использовалась МГД модель с осевой симметрией. Динамика ионов облака и фона рассчитываются. Используется условие квазинейтральности. В модели учитывается, в первом приближении, инерция электронов, т.е. процессы, происходящие на масштабах электронной ионной длины [1]. Сгустки плазмы последовательно создаются в однородной замагниченной плазме в фиксированной точке, начальный размер сферических сгустков много меньше динамического радиуса (R_d), а давление плазмы в сгустках много больше давления фона. Зависимости, полученные в численных расчетах, были подтверждены аналитическим анализом. В терминах размерных экспериментальных параметров оптимальные условия примерно соответствуют величине магнитного поля $B_0=300$ Гс, фоновой плазма из ионов аргона при температуре ~ 10 эВ, энергии лазерных сгустков $Q=25$ Дж при начальной скорости разлета 150 км/с.

Результаты экспериментов показали, что наблюдаемые в плазме магнитные возмущения, распространяются со скоростью $V>300$ км/с, имеют максимальную амплитуду $\delta B_{\max}/B_0=0.15\div 0.24$. Возмущения обладают правосторонней круговой поляризацией, что является характерным признаком вистлеров [2], частота и скорость которых практически линейно зависят от величины внешнего магнитного поля. В эксперименте, максимальная амплитуда достигается на расстоянии $r=7-10$ см от оси вакуумной камеры.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № АААА-А17-117021750017-0, Программы Президиума РАН № 56, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-32-00029, № 18-42-543019. Параллельное компьютерное моделирование было выполнено при помощи суперкомпьютерного центра Московского государственного университета, Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН и суперкомпьютерного центра Новосибирского государственного университета.

1. Shaikhislamov I. F., Antonov V. M., Zakharov Y. P., Boyarintsev E. L., Melekhov A. V., Posukh V. G., Ponomarenko, A. G. *Advances in Space Research* 2013. V.52. P.422-436.
2. Sulaiman, A. H., Gurnett, D. A., Halekas, J. S., et al. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 2017, V.122. P.227-234.

ДИФРАКЦИЯ КВАЗИЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ВОЛН НА ИДЕАЛЬНЫХ ПРОВОДНИКАХ В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ

Широков Е.А.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, evshirok@gmail.com

В работе проанализирована дифракция квазиэлектростатических волн, распространяющихся в направлении резонансного конуса, на идеальных проводниках в холодной магнитоактивной плазме. Рассмотрение проведено для металлического бесконечно длинного кругового цилиндра, параллельного внешнему магнитному полю.

В случае падения плоской квазиэлектростатической волны аналитически определено электромагнитное поле рассеяния (переизлучения), которое представляет собой суперпозицию полей, отвечающих обыкновенной и необыкновенной волнам. При этом первая не распространяется (затухает) в силу дисперсионных свойств плазмы, однако даёт вклад в дифракционную картину вблизи проводника; вторая распространяется и определяет структуру поля в дальней зоне. Показано, что поле необыкновенной волны может быть рассчитано в квазиэлектростатическом приближении. Найдено сечение рассеяния (на единицу длины) для указанного случая.

Результаты могут служить основой для расчётов дифракционных поправок в ситуациях, когда квазиэлектростатические волны регистрируются антеннами на космических аппаратах.

НАБЛЮДЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И ПОЛЯРНЫХ СИЯНИЙ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ И В СКАНДИНАВИИ ВО ВРЕМЯ СОПРЯЖЕННЫХ ПРОЛЕТОВ СПУТНИКА ERG

Демехов А.Г.^{1,2}, Козелов Б.В.¹, Попова Т.А.¹, Яхнин А.Г.¹, Никитенко А.С.¹, Федоренко Ю.В.¹, Ролдугин А.В.¹, Титова Е.Е.¹, Маннинен Ю.³

¹ ПГИ, г. Апатиты, Россия

² ИПФ РАН, г. Н.Новгород, Россия, andrei@ipfran.ru

³ Sodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, Finland

Представлены результаты наземных наблюдений низкочастотных электромагнитных волн и оптических свечений, проведенных Полярным геофизическим институтом (ПГИ) на Кольском полуострове и в Скандинавии во время сопряженных пролетов спутника ERG/Arase. Обсуждаются возможности инструментов и приводятся примеры наблюдений. Дан краткий обзор составленного каталога наблюдений для различных типов явлений. В частности, для наблюдений пульсирующих полярных сияний были проведены триангуляционные измерения с целью определения их высоты. Эти результаты могут быть сопоставлены с данными ERG по энергичным электронам. Измерения крайне низкочастотных и очень низкочастотных (КНЧ-ОНЧ) излучений проводятся с помощью широкополосного приемника, регистрирующего две горизонтальные компоненты магнитного поля и вертикальное электрическое поле. Эти данные получены в двух пунктах – Ловозеро на Кольском п-ове и Каннуслахто в Финляндии, которые удалены друг от друга примерно на 500 км. Приводятся примеры квазипериодических и хоровых ОНЧ излучений, для которых удалось определить область их выхода к Земле из магнитосферы. Третья часть каталога включает магнитные пульсации в диапазоне Pc1, которые соответствуют электромагнитным ионно-циклотронным (ЭМИЦ) волнам в магнитосфере. Возможные области их генерации могут быть определены с помощью исследования потоков энергичных ионов, измеренных на низкоорбитальных спутниках, и их сопоставления с данными ERG и Van Allen Probes по энергичным ионам и ЭМИЦ волнам, полученными на больших высотах в магнитосфере.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-52-50025 ЯФ_а).

ОНЧ-НАБЛЮДЕНИЯ ВО ВРЕМЯ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ЭКСПЕДИЦИИ “ТРАНСАРКТИКА 2019”

**Федоренко Ю.В.¹, Пильгаев С.В.¹, Клейменова Н.Г.^{2,3}, Маннинен Ю.⁴, Никитенко А.С.¹,
Ларченко А.В.¹, Филатов М.В.¹, Лебедь О.М.¹, Благовещенская Н.Ф.⁵, Фролов И.Е.⁵,
Козелов Б.В.¹**

¹ПГИ, г. Апатиты, Россия,

^{2,3}ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия;

⁴Геофизическая обсерватория Соданкюля, г. Соданкюля, Финляндия,

⁵Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт (ААНИИ),
г. Санкт-Петербург, Россия

Yury.Fedorenko@gmail.com

Представлено описание аппаратуры и первые результаты наблюдений СНЧ/ОНЧ-излучений (1–15 кГц), проведенных в полярных широтах во время специальной комплексной экспедиции “Трансарктика 2019”, организованной Арктическим и Антарктическим научно-исследовательским институтом. Наблюдения проводились на судне “Академик Трешников” с помощью высокочувствительного приемника, разработанного в Полярном геофизическом институте. В течение 13 из 26 дней наблюдений были зарегистрированы всплески ОНЧ-излучений типа аврорального хисса. Эти всплески одновременно наблюдались и в обл. Баренцбург, расположенной на ~600 км западнее и ~160 км южнее, и не регистрировались авроральных широтах на том же меридиане, в обл. Ловозеро и финской ст. Каннуслахто. В то же время, как правило, авроральный хисс, наблюдаемый в авроральных широтах, не был зарегистрирован в полярных. Этот факт заставляет предположить, что область выхода исследуемого аврорального хисса из ионосферы к земной поверхности была локальной и ограниченной по широте. Представлены результаты численного моделирования рассеяния электростатических ОНЧ волн аврорального хисса на мелкомасштабных ионосферных неоднородностях в конус прохождения к земной поверхности и их распространения в волноводе Земля-ионосфера, свидетельствующие в пользу этого предположения.

ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ АЗИМУТАЛЬНОГО УГЛА ВЕКТОРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЙ ОТ МАГНИТОСФЕРНЫХ И НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ДИАПАЗОНЕ 0.1-15 ГЦ.

Ермакова Е.Н., Щенников А.В., Рябов А.В., Котик Д.С.

НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия, l.ermakova@nirfi.unn.ru

В работе [1] была установлена корреляция между изменениями направления на вероятный источник, определенный по высыпаниям энергичных протонов и ориентации эллипса поляризации магнитного поля пульсаций Pc1 для среднеширотных станций. Угол между направлением на вероятный источник и большой осью эллипса поляризации ψ_{sm} составлял в среднем около $10-12^\circ$. В настоящей работе рассмотрены случаи значительного увеличения этого угла для магнитосферных излучений Pc1. На основе данных низкочастотного мониторинга на среднеширотных пунктах Новая Жизнь (55.74° с.ш., 46° в.д.) и Старая Пустынь (55.66° с.ш., 43.63° в.д.) выполнен анализ особенностей спектров азимутального угла ψ (отсчитывается от направления В-3) вектора магнитного поля магнитосферных излучений Pc1 в классическом диапазоне частот, высокочастотных Pc1 и излучений типа КУП и вычислен угол ψ_{sm} . Одновременно анализировались данные низкоорбитальных спутников по высыпаниям энергичных протонов [1,2]. Показано, что в некоторых случаях, когда была обнаружена существенная разница в значениях амплитуды, поляризационного параметра и азимутального угла ψ излучения Pc1 на станциях, разнесенных на малые расстояния, угол ψ_{sm} увеличивался до значений $\geq 50^\circ$. Также увеличение этого угла зарегистрировано для высокочастотных Pc1, что связано с близким положением приемной станции к месту выхода излучения на землю. Обнаружена разница в значениях ψ в “протонной” (выше экваториальной гирочастоты He^+) и “гелиевой” (ниже экваториальной гирочастоты He^+) полосах высокочастотного излучения Pc1.

В работе также исследованы особенности спектров азимутального угла УНЧ магнитных полей при наличии очагов локальной грозовой активности на территории Нижегородской области. Обнаружено, что характер частотной зависимости угла ψ на разных станциях с базой 120 км, может существенно различаться. Это связано с разным расстоянием от грозовой ячейки до приемных пунктов и с разным влиянием неоднородной ионосферы на спектры ψ в ночное время. В дневное время разная частотная зависимость ψ на разных станциях определялась тем, что направления на ближние грозы и всемирные грозовые очаги, вносящие в данный момент определяющий вклад в формирование Шумановского резонанса, на двух станциях различались в разной степени. Определено, что вектор магнитного поля составлял углы $\sim 10^\circ - 13^\circ$ с перпендикуляром к направлению на источник в темное время суток и $\sim 3^\circ - 5^\circ$ в светлое время суток. На основе сравнения экспериментальных и модельных спектров азимутального угла показано, что оптимальные для определения направления на источник частоты лежали в интервале (0.2-0.8 Гц). На этих частотах было наименьшим влияние неоднородной вертикальной структуры ионосферы, а вклад локальной грозовой активности был определяющим.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты №№, 18-42-520035, 18-05-00108.

1. E. N. Ermakova, A. G. Demekhov, T. A. Yahnina, A. G. Yahnin, and T. Raita, Radiophysics and Quantum Electronics, 2019, V. 62, No. 1, DOI 10.1007/s11141-019-09950-5.
2. E. N. Ermakova, A. G. Yahnin, T. A. Yahnina, A. G. Demekhov, and D. S. Kotik, Radiophysics and Quantum Electronics, 2016, V. 58, No. 8, DOI 10.1007/s11141-016-9628-3.

СВЯЗЬ ПРОТОННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ АНИЗОТРОПИИ С ПРОДОЛЬНОМ И ПОПЕРЕЧНЫМ ДАВЛЕНИЕМ ПРОТОНОВ В КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Фейгин Ф.З., Хабазин Ю.Г.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, feygin@ifz.ru

В различных частях земной магнитосферы [1] и магнитослое [2, 3] наблюдается обратная корреляция между протонной анизотропией A_p и продольным давлением горячих протонов $\beta_{\parallel p}$:

$$A_p = S_p / \beta_{\parallel p}^\alpha, \quad (1)$$

где величины S_p и α зависят от окружающих условий, как это показано численным методом в работе [4]. При анализе данных AMPTE//CCE на $L \geq 7$ эмпирическая связь (1) с $S_p < 1$ и α от 0.48 до 0.52 была найдена в дневном секторе магнитосферы [2], в подсолнечном магнитослое Земли [1, 4] получены значения $S_p = 0.85$ и $\alpha = 0.48 \pm 0.03$.

Далее здесь соотношение (1) выводится аналитически на основе линейной теории ЭМИЦ волн при конечном давлении горячих протонов. Для вывода (1) исходим из выражения инкремента ЭМИЦ неустойчивости при конечных бета:

$$\frac{\gamma}{\Omega_i} = \sqrt{\pi} \frac{\beta_\perp (\tilde{A} - x)(1 - x)^{5/2}}{\beta_\parallel^{3/2} x^2 (2 - x)} F^{1/2} \left[1 - \frac{x(1 - x)}{(2 - x)} \frac{d \ln F}{dx} \right]^{-1} \exp \left[-\frac{(1 - x)^3}{\beta_\parallel x^2} F \right], \quad F = 1 + \frac{1}{2} \beta_\perp \frac{(\tilde{A} - x)}{(1 - x)^3}. \quad (2)$$

Здесь $x = \omega / \Omega_i$ – нормированная частота, Ω_i – гирочастота протонов, $\beta_\perp = 8\pi n_h T_\perp / B_0^2$, $\beta_\parallel = 8\pi n_0 T_\parallel / B_0^2$, $\tilde{A} = 1 - T_\parallel / T_\perp = A / (A + 1)$. Когда $x \ll 1$, максимум инкремента достигается на частоте $x = x_m$, где $x_m^2 = F(N_p / \beta_{\parallel p})$, а сам максимум инкремента равен:

$$(\gamma / \Omega_i)_{\max} = \sqrt{\pi} e^{-1} (N_p \beta_{\parallel p} / 4F)^{1/2} [A - (A + 1)(FN_p \beta_{\parallel p})^{1/2}], \quad (3)$$

где $A = (T_\perp / T_\parallel) - 1$, $\beta_{\parallel p} = 8\pi n_p T_{\parallel p} / B_0^2$, n_p – плотность горячих протонов, B_0 – напряженность магнитного поля, $N_p = n_p / n_0$ и $e = 2.718...$ – основание натуральных логарифмов.

Из (3) следует

$$A = A_p \approx \left[2e\pi^{-1/2} (\gamma / \Omega_i)_{\max} \sqrt{F / N_p} + \sqrt{N_p F} \right] / (\sqrt{\beta_{\parallel p}} - \sqrt{N_p F}), \quad (4)$$

что для $N_p F \ll \beta_p$ близко к соотношению (1), где

$$S_p \approx 2e\pi^{-1/2} (\gamma / \Omega_i)_{\max} \sqrt{F / N_p} + \sqrt{N_p F}. \quad (5)$$

Используя стандартные параметры магнитосферной плазмы $A = 1$, $N_p = 0.2$, $x = 0.1$, $\beta_\perp = 0.1$, $(\gamma / \Omega_i)_{\max} = 8 \times 10^{-4}$, получаем $S_p \approx 0.51$.

Работа выполнена при поддержке Проекта Минобрнауки КП19-270 «Вопросы происхождения и эволюции Вселенной с применением методов наземных наблюдений и космических исследований» (Проект 28 П, 12) в рамках государственного задания института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

1. Anderson B.J., Fuselier S.A. // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P.1461.
2. Anderson B.J., Fuselier S.A., Gary S.P., et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P.5877.
3. Anderson B.J., Denton R.E., Ho G., et al. // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P.21527.
4. Gary S.P., McKean M.E., Winske D., et al. // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N. A4. P.5903.

УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭМИССИИ ДИАПАЗОНА 0.1–3 Гц В ПРИПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ

А.С. Потапов¹, А.В. Гульельми², Б.В. Довбня³

¹ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, potapov@iszf.irk.ru

²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, guglielmi@mail.ru

³ГО Борок ИФЗ РАН, п. Борок, Россия, dovbnya@inbox.ru

Рассмотрены характеристики двух типов излучений в высокочастотном краю УНЧ-диапазона (0.1–3 Гц) — серпентинной эмиссии и дискретных диспергированных сигналов. Оба типа наблюдаются в полярных шапках исключительно с помощью индукционных магнитометров. Поскольку в настоящее время эти инструменты в высоких широтах практически отсутствуют, то анализ проведен на основе записей 1968–1971 гг., полученных на близких к геомагнитным полюсам станциях Восток и Туле. Показано, что появление дискретных сигналов (DS) жестко привязано к магнитной силовой линии, проходящей через станцию наблюдения, имея острый пик частоты появления в местный магнитный полдень. В то же время, сезонный ход частоты появления DS имеет основной пик местным летом и дополнительный — местной зимой. С учетом полученного нами ранее результата о возбуждении, по крайней мере, части DS в области форшока, можно предположить, что падающие на магнитопаузу волновые пакеты проникают на внешние силовые линии преимущественно в околополуденной области и распространяются вдоль этих линий в обе стороны, попадая в конце концов на поверхность земли в приполярных областях. Серпентинная эмиссия (SE), судя по ее морфологии, попадает в магнитосферу непосредственно через каспы. Частота ее появления не имеет ни суточного, ни сезонного максимумов. Мы проверили и подтвердили выдвинутую ранее гипотезу о возбуждении SE циклотронной неустойчивостью протонов в солнечном ветре, промоделировав вариации частоты ионно-циклотронных волн при разных уровнях возмущенности межпланетной плазмы и сравнив результаты с наблюдавшимися вариациями частоты SE. Сделан вывод о необходимости возобновления непрерывных наблюдений УНЧ излучений с помощью индукционных магнитометров, установленных в полярных шапках вблизи проекций каспов и около геомагнитных полюсов.

Работа выполнена в рамках Государственных заданий ИСЗФ СО РАН (ФНИ П.16) и ИФЗ РАН (№ 0144-2014-00116), при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-05-00574), и проекта Минобрнауки КП19-270.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЕННЫХ ОБЛАКОВ В ЭНЕРГИЮ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН В МАГНИТОАКТИВНОМ ФОНЕ

Мирошниченко И.Б., Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Шайхисламов И.Ф.

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

Представлены результаты компьютерного моделирования задачи о разлете периодически повторяющихся плазменных сгустков в магнитоактивный фон. Периодически повторяющиеся сгустки позволяют создавать низкочастотные квазистационарные волны (КВ) нескольких типов: в том числе Альфвеновскую (АКВ) и медленную магнитозвуковую (МКВ) [1, 2].

Численно решались уравнения магнитной гидродинамики, причем плазма сгустка, плазма фона и электроны рассматривались как отдельные жидкости. Исследовалось влияние безразмерных параметров: плазменного числа β и Альфвеновского числа Маха M_A (начальной скорости разлета облака) на эффективность преобразования энергии сгустков в энергию потока плазмы, а также в энергию Альфвеновских и магнитозвуковых волн, распространяющихся вдоль силовых линий магнитного поля.

На рисунке 1 показана зависимость от Альфвеновского числа Маха отношения энергий (КПД), содержащихся в АКВ, МКВ и потоке плазмы сгустков, к суммарной энергии цуга сгустков. Энергия АКВ включает энергию магнитного поля и кинетическую энергию вращающейся в АКВ плазмы фона. МКВ и поток плазмы содержат кинетическую и тепловую энергию сжатой плазмы фона. В диапазоне $M_A \sim 0.1 \div 1$ около 40 % энергии сгустков закачивается в магнитную силовую трубку в виде потока плазмы сгустков. При M_A менее ~ 0.1 КВ практически не возбуждаются. Суммарный КПД возбуждения АКВ и МКВ максимален при $M_A < 0.2 \div 1$, при больших $M_A > 1$ формируются в основном МКВ и поток плазмы сгустков.

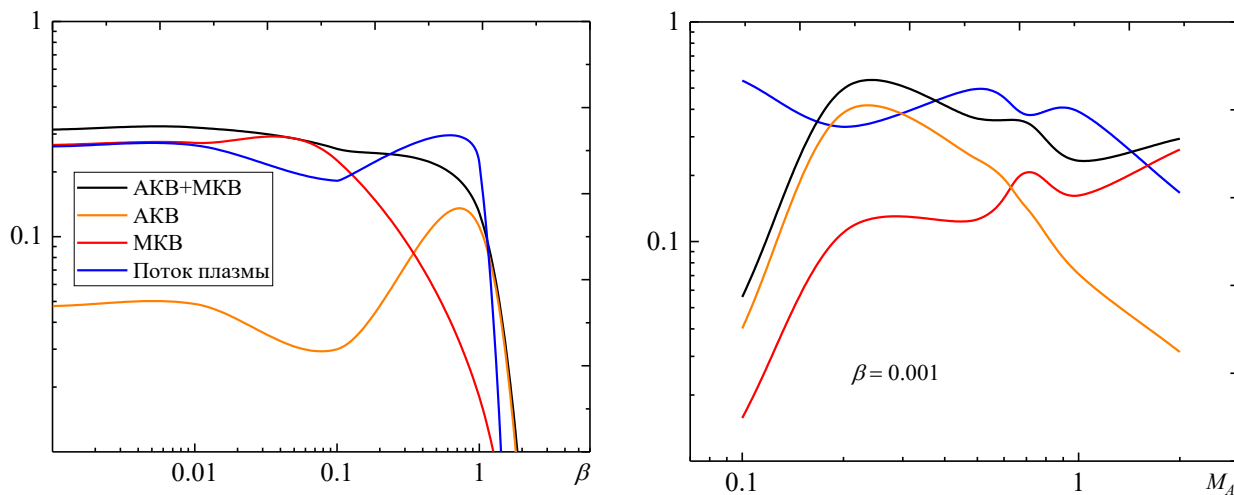


Рисунок 1. Зависимость эффективности преобразования энергии облака в энергию различных компонент, распространяющихся в силовой трубке магнитного поля

Работа выполнена в рамках Государственного задания № АААА-А17-117021750017-0, Программы Президиума РАН № 56, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-32-00029, № 18-42-543019. Параллельное компьютерное моделирование было выполнено при помощи суперкомпьютерного центра Московского государственного университета, Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН Сибирского суперкомпьютерного центра СО РАН и суперкомпьютерного центра Новосибирского государственного университета

1. В.Н.Тищенко, И.Ф.Шайхисламов. //Квантовая электроника 2014, Т. **44**(2), С.98.
2. В.Н. Тищенко и др. // ПЖТФ 2016, Т. **104**(5), С. 302.

РОЛЬ СИГНАЛОВ НАЗЕМНЫХ ОНЧ ПЕРЕДАТЧИКОВ В ДИНАМИКЕ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЗЕМЛИ.

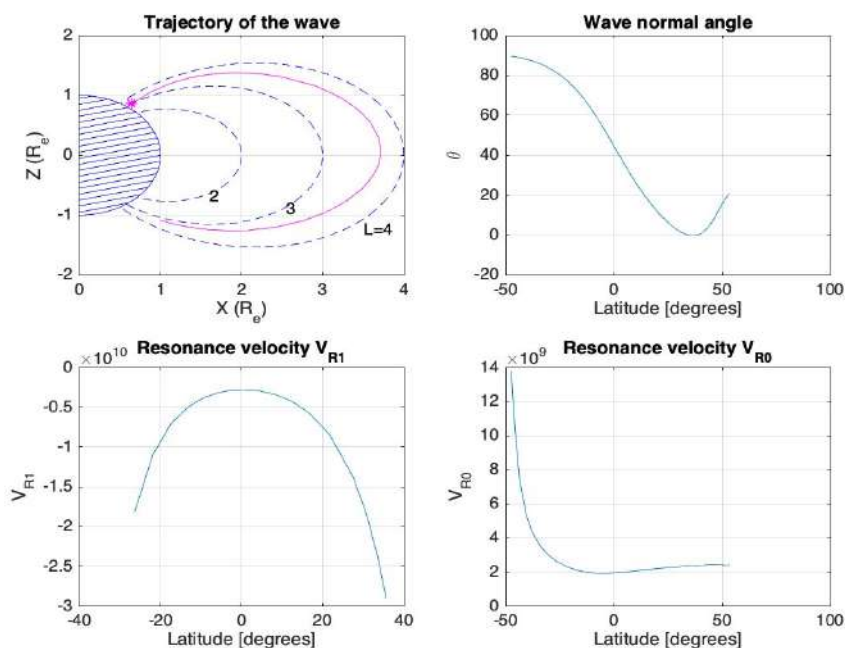
А. А. Лужковский¹, **Д. Р. Шкляр²**

¹МФТИ, г. Долгопрудный, Московская область, luzartyom@yandex.ru

²ИКИ РАН, г. Москва

Исследование механизмов нагрева электронов в радиационных поясах Земли до настоящего времени остается актуальной проблемой физики магнитосферной плазмы. Интерес к этой проблеме в последнее время был стимулирован запуском космических аппаратов Van Allen Probes, которые проводят исследования явлений в космической плазме непосредственно в радиационных поясах.

Среди механизмов нагрева электронов в радиационных поясах Земли важную роль играют механизмы, связанные с резонансным взаимодействием электронов с различными типами волн в магнитосферной плазме, среди которых свистовые волны имеют важнейшее значение, поскольку соответствующие резонансные энергии покрывают диапазон от единиц до сотен кэВ. Существуют три основных механизма генерации свистовых волн в магнитосфере Земли. К ним относятся генерация волн в результате развития циклотронной неустойчивости, возбуждение свистовых волн излучением молниевых разрядов и непосредственное излучение свистовых волн сигналами наземных ОНЧ передатчиков, поскольку ОНЧ диапазон (3 – 30 кГц) отвечает в магнитосферной плазме свистовым волнам. Резонансное взаимодействие энергичных (релятивистских) электронов с сигналами наземных ОНЧ передатчиков составляет содержание настоящего доклада.



На рисунке показаны траектория сигнала ОНЧ передатчика с частотой 7 кГц, угол волновой нормали θ вдоль траектории волны, а также величина резонансной скорости для частиц, взаимодействующих с волной на первом циклотронном резонансе (V_{R1}) и на черенковском резонансе (V_{R0}). Как видно из рисунка, на больших широтах абсолютная величина резонансной скорости становится соизмерима со скоростью света, так что при исследовании резонансного взаимодействия необходимо учитывать релятивистские эффекты.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-02-00179.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ВРЕМЕНЕМ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ ОТ СОЛНЦА ДО ЗЕМЛИ И ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Черток И.М.

ИЗМИРАН РАН, г.о. Троицк, г. Москва, Россия, ichertok@izmiran.ru

Рассмотрен большой ансамбль из более чем 140 изолированных нерекуррентных геомагнитных бурь (ГМБ) разной интенсивности, которые достаточно уверенно отождествлены с эруптивными источниками на Солнце. В ансамбль вошли, в частности, экстремальные исторические ГМБ, начиная со знаменитого каррингтоновского события 01.09.1859, сильные и средние ГМБ, произошедшие до 2018 г. включительно, а также некоторое количество произвольно выбранных слабых ГМБ, вплоть до индекса $Dst \approx -50$ нТл. В отличие от рекуррентных ГМБ, связанных с относительно быстрыми потоками солнечного ветра из корональных дыр, спорадические ГМБ вызываются корональными выбросами (coronal mass ejections; CMEs) и их межпланетными продолжениями (ICMEs).

Цель анализа – получить возможно полную картину соотношения между транзитным временем распространения CMEs/ICMEs от Солнца до Земли (точнее между временным интервалом ΔTr от момента эрупции на Солнце до времени наступления пика соответствующей ГМБ) и максимальной интенсивностью данной ГМБ, измеряемой индексом Dst . События разделены на две группы: в одну вошли ГМБ, источником которых была эрупция CME из активной области (AR-события), в другую – ГМБ, вызванные эрупцией волокна из района спокойного Солнца вне активных областей (QS-события).

Распределение большого числа анализируемых событий на плоскости " $\Delta Tr - Dst$ " подтверждает и существенно уточняет известные закономерности. QS-события характеризуются бóльшим транзитным временем ($\Delta Tr \approx 3-5$ суток) и гораздо меньшей интенсивностью ГМБ (в основном, $Dst > -200$ нТл) по сравнению с AR-событиями ($\Delta Tr \approx 1-4$ суток; Dst до -600 нТл). Для событий обеих групп при меньшем транзитном времени CMEs/ICMEs наблюдаются более интенсивные ГМБ: в частности, для AR-событий при сокращении ΔTr от 4 до 1 суток Dst уменьшается в среднем от -100 до -470 нТл и может достигать ≈ -900 нТл.

С точки зрения природы ГМБ и их источников на Солнце полученные результаты означают, что и скорость CMEs/ICMEs, и напряжённость переносимого ими магнитного поля в значительной степени определяются параметрами соответствующих солнечных эрупций, в частности, эруптивным магнитным потоком и выделяемой энергией.

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В 24 ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Ишков В.Н.

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

Физические условия, сложившиеся в текущем солнечном цикле, современные методы обработки наблюдений и возможность отслеживать корональные дыры непрерывно на всей поверхности Солнца позволяют более подробно рассмотреть вопросы строения и эволюции корональных дыр и выявить характеристики, от которых зависит их геоэффективность. Ослабление общего магнитного поля Солнца в текущем солнечном цикле привело к значимому ослаблению магнитных полей всех активных образований и структур и, в том числе, в корональных дырах. Заметное уменьшение величины магнитного поля корональных дыр занимающих интервал 0.2–8.7 Гс со средней величиной 3–1.6 Гс, по сравнению с предыдущими солнечными циклами 21-23 (3–36 Гс) и переходным 23 – ~20 Гс в фазах максимумов и 1–7 Гс, со средним ~5 Гс в минимумах предыдущих солнечных циклов, что, с большой вероятностью, ослабило геоэффективность их высокоскоростных потоков. В период минимума 24-го цикла площадь корональных дыр была максимальной, а напряженность и поток магнитного поля оказались минимальными за весь период наблюдений корональных дыр. Высокоскоростные потоки солнечного ветра в текущем солнечном цикле не обеспечивают достаточного воздействия на околоземное космическое пространство для осуществления значимых геомагнитных возмущений. В докладе рассматриваются характеристики корональных дыр как общие для любых эпох солнечной активности, так и их специфические свойства, проявившиеся в эпоху пониженной солнечной активности. Учёт магнитных, геометрических и яркостных параметров корональных дыр в текущем солнечном цикле, открывшем эпоху пониженной солнечной активности позволяет выявить граничные параметры геоэффективности корональных дыр для раннего прогноза степени воздействия, связанных с ними высокоскоростных потоков солнечного ветра, на околоземное космическое пространство.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ГР № 01201361524, Тема 16 "Циклы и прогноз солнечной активности".

РОЛЬ КАТАЛОГОВ СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ И КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА

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

1 НИИЯФ МГУ, 2 ФИАН, 3 ИПГ, 4 ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, logachev@srd.sinp.msu.ru

Исследования проявлений солнечной активности в эпоху интенсивного изучения космоса потребовало систематизации данных о возрастаниях солнечных космических лучей, выявление их источников и изучение последствий воздействия активных процессов на Солнце на околоземное космическое пространство.

Солнечные протонные события (СПС) характеризуются большим разбросом величин потоков частиц, разнообразием их временных профилей и энергетических спектров, что связано с различием условий на Солнце и в межпланетной среде. Корректное выявление закономерностей в распределении параметров СПС с целью определения механизмов генерации частиц и условий их распространения возможно только на базе статистического подхода, главным условием которого является однородность анализируемых рядов данных.

Коллективом сотрудников НИИЯФ МГУ, ФИАН, ИЗМИРАН, ИПГ создается Каталог СПС, наблюдавшихся в 24 цикле (2008-2019 гг.) солнечной активности (СА), в которых максимальный поток частиц с энергией $E \geq 10$ МэВ был (также, как и в предшествующих отечественных каталогах) не менее $1 \text{ pfu} = 1 \text{ частица}/(\text{см}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{sr})$. Каталог СПС 24 цикла СА является продолжением ранее созданных Каталогов за предыдущие циклы с 1955 до 2008 гг. и дополняет однородный ряд данных о СПС. Первый Каталог (1955-1969 гг.) был составлен в 1975 г. международной исследовательской группой (при участии советских ученых) под руководством известных специалистов по физике Солнца Z. Svestka & P. Simon. Каталоги СПС следующих циклов СА (20 цикл – 1964-1975 гг., 21 цикл – 1975- 1986 гг., 22 цикл – 1986-1996 гг. и 23 цикл – 1997-2008 гг.) созданы и опубликованы в СССР и России. Каталог солнечных протонных событий 23 цикла солнечной активности является единственным каталогом, размещенным в Национальной базе гелиогеофизических данных США в разделе «Космическая погода» [<https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/interplanetary-data/solar-proton-events/documentation/>]. В Мировом Центре Данных по солнечно-земной физике размещены Каталоги СПС с 19 по 23 циклы СА [<http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/>]. В целях использования уже в настоящее время всего массива данных по СПС 19-24 циклов СА создана общая таблица СПС 24 цикла СА (2009-2019 гг., в 2018-2019 гг. СПС не наблюдалось), в которой представлены характеристики каждого СПС, а также информация об источниках частиц на Солнце. Таблица СПС 24 цикла СА размещена в Мировом Центре Данных [http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/List_SPE_24_Cycle_SA.ru.pdf]. В целях создания интерактивной формы Каталогов СПС на сайте Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ [<http://smdc.sinp.msu.ru>] в разделе «Космическая погода» создана страница Каталогов СПС 20-24 циклов СА [http://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru]. Создан общедоступный предварительный вариант интерактивной формы Каталога СПС 24 цикла СА, который позволяет использовать и скачать общую таблицу СПС 24 цикла СА, список литературы по СПС 24 цикла СА, а также из списка СПС 2010-2012 гг. выбирать события и получать по ним обзорные временные профили потоков частиц и сопутствующих параметров.

Каталоги СПС являются необходимым инструментом в гелио- и геофизических исследованиях, а также незаменимы для прогноза космической погоды и для планирования и обеспечения радиационной безопасности полетов космических аппаратов различного назначения, главными из которых в ближайшее десятилетие будет освоение Луны и подготовка к полетам человека на Марс, где одной из основных угроз является опасность поражения от солнечных и галактических космических лучей. Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 19-02-00264.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ F2-СЛОЯ ИОНОСФЕРЫ (GDMF2)

В. Н. Шубин

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

Критическая частота F2-слоя является наиболее важной характеристикой ионосферы для оценки влияния космической погоды на распространение радиоволн. В работе представлены результаты проверки эффективности глобальной динамической модели GDMF2 (Global Dynamic Model of the F2 layer) на средних и высоких широтах, как в спокойных, так возмущенных геомагнитных условиях. Приведены результаты статистического анализа и среднеквадратические ошибки моделей GDMF2 и IRI-2016 относительно экспериментальных значений foF2, полученных, как на наземных ионозондах, так и с помощью спутников.

АНАЛИЗ СУТОЧНОЙ ЗАВИСИМОСТИ МПЧ И СТРУКТУРЫ ИОНОГРАММ НЗ ДЛЯ ОДНОСКАЧКОВОЙ АВРОРАЛЬНОЙ РАДИОТРАССЫ В СПОКОЙНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЯХ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ

Крашенинников И.В.¹, Благовещенский Д.В.², Шубин В.Н.¹, Рогов Д.Д.³

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

ГУАП, г. Санкт-Петербург, Россия, donatbl@mail.ru

АНИИИ, г. Санкт-Петербург, Россия

Ионосфера высоких широт имеет существенно более сложную структуру, чем в средних широтах, и, в частности, характеризуется такими крупномасштабными образованиями как авроральный овал и главный ионосферный провал, положение которых зависит от уровня гелиогеофизической активности. Соответственно, как вертикальное, так и наклонное радиозондирование ионосферы имеет свои особенности в применении к такой сложной среде, в частности, данные имеют: повышенную диффузность следов мод на ионограммах, авроральное поглощение и боковые отражения, обусловленные крупномасштабными структурами. Вероятность аномальных способов переноса излучения между терминальными точками в авроральной зоне возрастает с увеличением геомагнитной активности и первым шагом оценки эффективности глобальных моделей ионосферы с включением области высоких широт является их апробация в спокойных и слабо возмущенных условиях.

В данной работе представлены результаты анализа достоверности глобальной модели с динамическим слоем F2 ионосферы [1] (GDMF2), областью применимости которой является суточный интервал, в описании временной зависимости максимально наблюдаемой частоты (МПЧ) на авроральной радиотрассе Диксон – Певек (2930 км) в спокойных - 13/02/2014 и слабовозмущенных - 14/02/2014 условиях. Для дня 13/02/2014 суточная зависимость МПЧ мод 1F2 и 2F2 представлена на рисунке 1 и можно видеть, что модель GDMF2 с классическим высотным распределением электронной плотности модели IRI [2] наиболее близка к экспериментальным данным наклонного радиозондирования ионосферы.

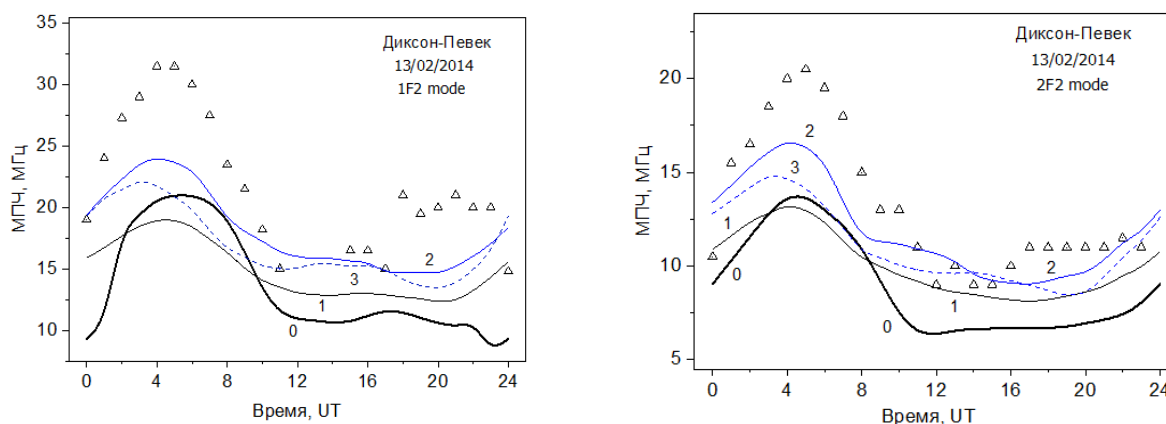


Рис. 1. Суточный ход МПЧ мод 1F2 и 2F2 на радиотрассе Диксон-Певек 13/02/2014: эксперимент - МНЧ (полые треугольники), расчетные МПЧ в модели IRI (кривые 0) и модели GDMF2 (кривые 1) для медианных гелиогеофизических условий и в модели GDMF2 (кривая 2 – со стандартным, кривая 3 – с модифицированным $Ne(h)$ -профилем модели IRI- Altadill) для условий данного дня.

1. Шубин В. Н., Деминов М.Г. Глобальная динамическая модель критической частоты F2-слоя ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 59. № 4. С. 461–473. 2019.
2. Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. V. 15. P. 418–429. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016SW00159>

МОДУЛЯЦИЯ СПОРАДИЧЕСКИХ Е-СЛОЕВ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ АТМОСФЕРНЫМИ ВОЛНАМИ

Губенко В.Н., Кириллович И.А.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия, vngubenko@gmail.com

Спорадические Е-слои (E_s) представляют собой тонкие слои повышенной ионизации на высотах от 90 до 130 км в ионосфере Земли. Исследование эффектов, связанных с E_s -структурами, актуально для обеспечения бесперебойной работы систем радиосвязи и навигации. Радиозатменные измерения спутников CHAMP (Challenging Minisatellite Payload) были использованы для исследования спорадических Е-слоев в ионосфере Земли. Параметры ионосферных структур определялись на основе анализа высотных зависимостей фазового пути и интенсивности радиозатменного сигнала CHAMP, зарегистрированного на GPS-частоте 1575,42 МГц. Данный способ позволяет оценить смещение плазменного слоя по отношению к перигею радиолуча, определить угол наклона слоя к локальному горизонту и найти фактическую высоту его расположения [1, 2].

Распространение мелкомасштабной атмосферной волны модулирует структуру изначально горизонтального спорадического Е-слоя, что приводит к наклону этого слоя относительно плоскости локального горизонта. На основе того, что внутренняя гравитационная волна (ВГВ) обуславливает угол наклона E_s -слоя, разворачивая плоскость ионизации слоя параллельно ее фазовому фронту, мы разработали новый метод определения характеристик внутренних атмосферных волн на ионосферных высотах. Здесь наклонные спорадические структуры в ионосфере Земли служат в качестве детектора внутренних атмосферных волн. При восстановлении параметров ВГВ использовались базовые выражения (дисперсионное уравнение, поляризационные соотношения связи, определения волновых характеристик) для внутренних гравитационных волн [3, 4].

Данный метод позволяет изучить взаимосвязи между мелкомасштабными внутренними волнами и спорадическими Е-слоями в ионосфере Земли и существенно расширяет возможности традиционного радиозатменного мониторинга атмосферы. Найдено, что исследуемые внутренние атмосферные волны имеют периоды от 35 до 46 минут и вертикальные фазовые скорости от 1.2 до 2.0 м/с, что хорошо согласуется с результатами независимых экспериментов и данными моделирования спорадических Е-структур на высоте ~100 км в полярной шапке Земли [5, 6].

Работа выполнена в рамках государственного задания и частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 19-02-00083 А) и программой № 12 Президиума РАН.

1. Pavelyev, A.G., Liou, Y.A., Zhang, K. et al. // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. **5**, P. 1–16.
2. Pavelyev, A.G., Liou, Y.A., Matyugov, S.S et al. // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. **8**, P. 2885–2899, doi: 10.5194/amt-8-2885-2015.
3. Gubenko, V.N., Pavelyev, A.G., Kirillovich, I.A., Liou, Y.-A. // Advances in Space Research. 2018. V. **61**, P. 1702–1716, doi: 10.1016/j.asr.2017.10.001.
4. Gubenko, V.N., Kirillovich, I.A. // Solar-Terrestrial Physics. 2019. V. **5**, P. 98–108, doi: 10.12737/stp-53201912.
5. MacDougall, J.W., Jayachandran, P.T., Plane, J.M.C. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2000. V. **62**, P. 1155–1167.
6. MacDougall, J.W., Plane, J.M.C., Jayachandran, P.T. // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2000. V. **62**, P. 1169–1176.

МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ РАДИОТРАСС, ПРОХОДЯЩИХ НА ВЫСОКИХ И СРЕДНИХ ШИРОТАХ

**И.В. Мингалев¹, А.М. Мерзлый^{2,3}, А.Б. Талалаев⁴, Л.Г. Устименко⁵, В.В. Тихонов⁶
А.Т. Янаков², Я.А.Сахаров¹, З.В. Суворова¹**

¹ ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, mingalev_i@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 Институт прикладной геофизики, РосГидроМет, г. Москва, Россия

⁶ АО «РТИС ВКО», г. Тверь, Россия

В докладе представлен анализ информации о состоянии ионосферы, которую может дать работа радиотрасс между различными точками в Арктике и на средних широтах при условии, что кроме времени прохождения сигнала будут измеряться углы прихода сигнала в приемную антенну и мощность принятого сигнала. Представлены результаты расчетов зон на поверхности Земли, в которые попадают односкачковые лучевые траектории радиоволн КВ диапазона, выходящие из одного передатчика. На основе расчетов для разных положений передатчика и разных геофизических условий делаются выводы о расположении набора радиотрасс, которые позволят определять текущее положение главного ионосферного провала.

РАСЧЕТЫ ЗОН ЗАСВЕТКИ ОДНОСКАЧКОВЫМИ ЛУЧЕВЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ РАДИОВОЛН КВ-ДИАПАЗОНА ДЛЯ ПЕРЕДАТЧИКОВ, РАСПОЛОЖЕННЫХ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ

**И.В. Мингалев¹, З.В. Суворова¹, А.М. Мерзлый^{2,3}, А.Б. Талалаев⁴, В.В. Тихонов⁵,
А.Т. Янаков², В.С. Мингалев¹**

¹ ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Анатиты, Россия, mingalev_i@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 области на поверхности Земли, в которую попадают выходящие из одного передатчика односкачковые лучевые траектории радиоволн КВ диапазона. Эта область существенно меняется в течение суток. Исследуются изменения этой зоны для передатчиков, расположенного в нескольких точках на широтах от 46 до 60 градусов сев. шир. в течение суток для разных дат и для разных частот КВ диапазона, близких к максимальной применимой частоте (МПЧ) для данных условий. Проводится анализ результатов моделирования и делается вывод о возможности односкачковой КВ радиосвязи между районом Баренцева моря и районами, расположенными на средних широтах.

МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ НА ПРИМЕРЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Соколова О.Н.

СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия, sokolova.olga87@gmail.com

Согласно [1], явление характеризуется как катастрофа, если оно приводит к экономическому ущербу более чем 99 млн. долл. США, 20 погибшим или пропавшим без вести, 40 раненым, 2000 оставшимся без крова. Например, ураган Мэтью в 2016 году привел к экономическим потерям в размере 12,6 млрд. долл. США, 734 пострадавшим, оставил 150 тыс. человек без крова и 1 млн. потребителей без электроснабжения. Сильные геомагнитные бури (ГМБ) могут привести к сопоставимым потерям. Увеличение стоимости ущерба при системных авариях, вызванных ГМБ во многом усугублено ошибкой персонала вследствие отсутствия разработанных и внедренных методик минимизации рисков негативных эффектов при предупреждении и ликвидации явлений.

Принятый алгоритм оценки рисков состоит из пяти этапов: анализ, оценка, исследование/контроль, оповещение, наблюдение. На первом этапе составляется список рисков и неопределённостей, оценка которых, а также поиск путей уменьшения влияния неопределённостей производится на втором. На третьем этапе производится исследование и контроль мероприятий по минимизации рисков. Информирование участников мероприятий как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях реализуется на четвертом этапе. Постоянное наблюдение с целью корректировки составленного списка рисков/неопределённостей и разработанной системы мероприятий осуществляется в рамках пятого этапа. При определении комплекса мероприятий рекомендовано руководствоваться следующими принципами: прогнозирование, координация, коммуникация, подготовленность, непрерывность, интеграция. Доклад посвящен методам усовершенствования первого принципа – прогнозированию, направляемого на адекватную оценку рисков и разработку моделей прямых и косвенных воздействий.

Мероприятия по повышению качества прогнозирования ГМБ могут быть разработаны на основе стратегий для других природных явлений. Развитие средств и методов прогнозирования состоит из нескольких этапов: регистрация социально-экономических последствий, визуальные наблюдения, инструментальные наблюдения, создание синоптических карт, координирование прогнозирования в реальном времени в нескольких географически удаленных точках, субъективный анализ, объективный анализ. Можно различить два типа возмущений, приводящих к неустойчивой работе социотехнических систем, а именно: ординарные возмущения и экстремальные явления (black swan). Для каждой из этих групп существуют ограничения по средствам прогнозирования, особенно для экстремальных явлений. Предложено классифицировать ГМБ как идеальный шторм (perfect storm), что позволяет расширить спектр средств и повысить объективность прогноза ГМБ. Опыт минимизации последствий других явлений, характеризующихся как идеальный шторм, показал необходимость превентивной оценки зон высокого риска и разработки алгоритмов оценки, доступных для широкого применения. Пример такого алгоритма, основанного на анализе критических факторов разной природы, приведен в [2].

Наиболее сильной из зарегистрированных ГМБ (по ряду параметров) является так называемое событие Каррингтона в 1859 г., которое принято рассматривать в качестве эталонного ГМБ. Тем не менее, разработка мероприятий по минимизации менее сильных ГМБ не должна оставаться вне поля зрения профессионального сообщества с последующей эффективной коммуникацией между заинтересованными сторонами.

1. Sigma, Swiss Re // Swiss Re 2017.
2. Sokolova O., Burgherr P., Sakharov Ya., Korovkin N. // Space Weather 2018.

АНАЛИЗ ПРОГНОЗА СОБЫТИЙ ПРИХОДА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА ОКОЛОЗЕМНУЮ ОРБИТУ ЗА ПЕРИОД 2010-2019 ГОДЫ

Шугай Ю.С., Калегаев В.В., Нгуен М.Д., Бобровников С. Ю.

НИИЯФ МГУ г. Москва, Россия, jshugai@srd.sinp.msu.ru

В работе проанализированы прогнозы скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра (ВСП СВ), полученные в режиме реального времени системой прогноза Центра Анализа Космической Погоды НИИЯФ МГУ за период с 2010 по 2019 гг. Текущий прогноз, а также значения прогноза скорости из базы данных, представлены на сайте http://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1. Для оценки качества прогноза обычно вычисляются такие ошибки, как среднеквадратичное отклонение, коэффициент корреляции и другие. Однако, приведенные ошибки мало что говорят о том, насколько хорошо прогнозируются сами события прихода ВСП СВ на околоземную орбиту. Для оценки такой характеристики прогноза можно использовать подход на основе бинарных метрик. Для этого определяется тип события: истинно-положительное событие (True Positive), когда наблюдаемому на околоземной орбите ВСП соответствует спрогнозированный ВСП; промахи (False Negative), когда наш метод не прогнозирует наблюдаемый ВСП; ложные тревоги (False Positive), когда спрогнозированный ВСП не наблюдается на околоземной орбите. На основе полученной статистики рассчитывается ряд бинарных метрик, например, вероятность детектирования события, вероятность ложных срабатываний, способность модели спрогнозировать событие правильно и другие. Мы сравнили, полученные нами значения бинарных метрик с данными, приведенными в статье [1], для двух моделей прогноза ВСП СВ (Empirical Solar Wind Forecast и Wang-Argge-Sheeley) для периода 2011-2014 гг. Было получено, что модель НИИЯФ МГУ и Empirical Solar Wind Forecast (на основе анализа площадей корональных дыр) завышают количество событий прихода ВСП СВ, тогда как модель WSA (на основе данных магнитограмм) занижает количество событий.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ №16-17-00098

1. Reiss et al. // Space Weather 2016, 14.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ ЗА ПЕРИОД 2010-2012 ГГ

Капорцева К.Б., Шугай Ю.С.

МГУ, г. Москва, Россия; НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия kb.kaportceva@physics.msu.ru

В работе исследуется качество прогноза межпланетных корональных выбросов масс (МКВМ), сделанного при помощи объединения модели квазистационарных потоков солнечного ветра с моделью спорадических потоков. В качестве модели квазистационарных потоков солнечного ветра используется модель прогноза скорости солнечного ветра Центра Прогноза Космической Погоды НИИЯФ МГУ [1], работающая в режиме онлайн. Прогноз КВМ осуществляется с помощью Simple Drag-Based Model [2]. В работе анализируются результаты моделирования распространения КВМ за период 2010-2012 годы, полученные с использованием входных параметров КВМ из разных источников: SEEDS и SACTus, и прогнозов квазистационарных потоков солнечного ветра, в качестве среды, по которой распространяются КВМ. Было проведено сравнение спрогнозированного времени прихода МКВМ и их скоростей с данными из открытых каталогов МКВМ (Ричардсона и Кейна и GMU CME List). На основе сравнения сделан вывод, что более точный прогноз на фазе роста 24го цикла солнечной активности получен на данных о параметрах КВМ из базы SACTus. Ошибки прогнозирования параметров МКВМ сравнимы с ошибками других существующих моделей [3].

В работе проиллюстрирован принцип работы системы онлайн прогноза КВМ, разрабатываемой в Центре Прогноза Космической Погоды НИИЯФ МГУ с помощью указанного подхода на примере событий 2010 года.

Работа выполнена за счет гранта РФФИ №16-17-00098.

1. Shugay, Y.S., Veselovsky, I.S., Seaton, D.B. et al. Hierarchical approach to forecasting recurrent solar wind streams // Solar System Research. 2011. V 45. № 6. P. 546.
2. Vrsnak B., Zic. T, Vrbaneck D., et al. Propagation of interplanetary coronal mass ejections: The drag-based model // Solar Physics. 2013. V.285. P.295.
3. Riley P., Mays M. L., Andries J. Forecasting the Arrival Time of Coronal Mass Ejections: Analysis of the CCMC CME Scoreboard // Space Weather. 2018. V16. p. 1245-1260

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ ПО ДАНЫМ СИНОПТИЧЕСКИХ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Тлатов А.Г.¹, Богод В.М.², Березин И.А.¹

¹Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН, Россия, tlatov@mail.ru

²САО РАН, Россия

В настоящее время прогнозирование космической погоды (КП), вызываемой солнечной активностью, является необходимым условием для успешного осуществления космических программ, авиасообщения на высоких широтах и других задач, в том числе и задач специального назначения. В данной работе мы представляем комплекс, состоящий из наземных телескопов, математических моделей и аппаратно-программных средств для оперативного прогнозирования параметров космической погоды. Комплекс осуществляет решение следующих задач.

- Прогнозирование параметров солнечного ветра (СВ) в гелиосфере и вблизи Земли в частности. Реконструкции параметров солнечного ветра производится по данным наблюдений магнитографа СТОП, моделирования и реконструкции параметров СВ на основе модели Wang-Sheley-Arge и баллистической модели распространения потоков солнечного ветра от поверхности источников. В этой модели считается, что на расстояниях до поверхности источника ($R_s \sim 2.5R_o$) скорость солнечного ветра определяется фактором расширения магнитного поля. Выше R_s , солнечный ветер распространяется радиально. При этом быстрые и медленные потоки могут взаимодействовать между собой. Результаты прогнозирования ежедневно представлены на сайте <http://solarstation.ru/sun-service/forecast>.

- Детектирование и расчет геоэффективности корональных выбросов массы (КВМ). Параметры КВМ, а именно вектор скорости и оценка плотности на начальном этапе распространения определяются по данным патрульных телескопов. В дальнейшем распространение КВМ через гелиосферу определяется на основе модели, основанную на взаимодействии КВМ с солнечным ветром через аэродинамическое сопротивление. В модели мы рассматриваем КВМ в виде облака, представленного набором точек и отслеживаем траекторию движения каждой точки в гелиосфере, вплоть до орбиты Земли.

- Прогноз солнечных вспышек на основе ежедневных синоптических наблюдений солнечной активности в оптическом и радиодиапазоне. Многофакторная модель построена на основе машинного обучения. Модель позволяет осуществлять прогноз количества и мощностью солнечных вспышек с один-два дня с высокой достоверностью.

- Прогноз фонового потока жесткого излучения по данным наземных наблюдения солнечной активности на основе моделирования нейронных сетей.

Комплекс построен на основе телескопов, включающих “классические” оптические телескопы для наблюдения фотосферы, хромосферы и короны Солнца. Оптические телескопы с непрерывным режимом наблюдений, позволяющие наблюдать в центре и крыльях спектральных линий. Основное назначение таких телескопов регистрация КВМ и солнечных вспышек. Телескопы магнитографы с высокой чувствительностью магнитного поля, для реконструкции источников высокоскоростного солнечного ветра. Радиотелескопы сантиметрового диапазона, для прогнозирования солнечных вспышек и потоков жесткого излучения.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проекты № 18-52-34004 и 18-02-00098, и Программой ОФН РАН 12.

РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА РЕКОНСТРУКЦИИ ГАВАНСКОЙ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ В СОСТАВЕ РОССИЙСКИХ СЛУЖБ СОЛНЦА И КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Богод В.М., Кузанын К.М., Лесовой С.В., Стороженко А.А., Тлатов А.Г., Omar Pons, Marta Uratsuka, Ramses Zaldívar, Sierra Pablo

САО РАН, п. Н.Архыз, Россия, VMBog.spb@gmail.com

Необходимость воссоздания Гаванской наблюдательной солнечной станции сегодня диктуется важностью получения регулярного прогноза активности Солнца в широком диапазоне временных интервалов. Создание проекта Гаванской наблюдательной солнечной станции преследует следующие цели:

(i) Всесторонняя разработка наземного наблюдательного пункта, включающего в себя наблюдательный мониторинг активного Солнца, циклических и импульсных проявлений активности от 11-летнего цикла до суточных и часовых интервалов прогнозирования мощных вспышек.

(ii) Заполнение наблюдательного суточного интервала в основных частотных диапазонах, включающие слежение в линиях К Ca II и H- альфа, радионаблюдений в широком диапазоне радиочастот от 2-24 ГГц, высокоточные наблюдения на волне 10,7 см и в метровом диапазоне волн.

(iii) Проект Гаванской станции будет положен в основу создания ряда наблюдательных пунктов, которые войдут в Российскую службу Солнца, функции, работы которой будут независимы от космических наблюдений, но использующие их для контроля качества.

Для организации прогноза солнечной активности на кратковременных интервалах, требуются данные о глобальных трендах и долговременной солнечной цикличности, определяемых 22-х летним циклом магнитной активности (с учетом положительной и отрицательной полярности), зачастую упрощенно представляемым 11-летним циклом солнечных пятен.

Оценки величины корональных магнитных полей, и их мониторинг являются важным средством краткосрочного вспышечного прогноза (1-3 дня) и мощности взрывных процессов. Радиоастрономический мониторинг активности Солнца на длине волны 10.7 см полностью коррелирует с индексом Вольфа, но более надежен ввиду его независимости от погоды. Оценки потоков УФ излучения можно получать, используя данные наземных наблюдения в радиодиапазоне на волне 10,7 см, индексы солнечных пятен, интенсивности солнечной короны и др.

Работы по данному проекту мы рассматриваем как часть более общей задачи по созданию Российской службы Космической Погоды, в которой кубинской станции отводится важное место благодаря ее удачному расположению по долготе, что значительно расширяет временной интервал суточного мониторинга.

Работа выполняется при финансовой поддержке фондов РФФИ 18-52-34004 и СИТМА в рамках научного проекта «Обновление радиоастрономической станции Гаваны для мониторинга солнечной активности и фундаментальных исследований Солнца».

СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СВЯЗИ МАКСИМАЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ И РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК

Очелков Ю.П.

ИПГ, РОСГИДРОМЕТ, г. Москва, Россия, yur_och@mail.ru

В работе исследуется взаимосвязь между максимальными интенсивностями протонных событий (СПС) J_p (с энергиями протонов 30-100 МэВ) и максимальными потоками рентгеновского излучения от предшествующих рентгеновских вспышек J_x (диапазон длин волн 0.1-0.8 нм). Показывается не применимость метода корреляционного анализа для этой цели. Предлагается использовать вероятностный подход.

Показывается, что условная вероятность наблюдения протонного события с интенсивностью J_p в единичном интервале интенсивностей после рентгеновских вспышек с плотностью потока излучения в максимуме J_x : $w(J_p/J_x)$ - имеет следующую зависимость от аргументов:

$$w(J_p/J_x) = \sigma(J_p/J_x^4) * 1/J_x^4, \text{ где } \sigma - \text{некоторая функция.}$$

Это означает, что имеют место следующие зависимости от J_x среднего значения интенсивности СПС $\langle J_p \rangle$: $\langle J_p \rangle = C * J_x^4$ и среднего значения логарифма интенсивности СПС: $\langle \lg J_p \rangle = 4 * \lg J_x + D$, где C и $D = \text{const}$ (усреднение по всем СПС после всплеска с потоком в максимуме J_x).

Показывается, что среднеквадратичное отклонение от среднего значения для логарифма максимальной интенсивности СПС не зависит от потока в максимуме предшествующего рентгеновского всплеска.

Найденные соотношения могут быть использованы при разработке методов прогноза протонных событий по рентгеновскому излучению вспышек.

О ФИЗИЧЕСКОМ СМЫСЛЕ КРИТЕРИЯ ТАНАКА-ЕНОМЕ

Курочкин Е.А.¹, Петерова Н.Г.¹, Топчило Н.А.², Шендрик А.В.¹

¹СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, k-u-r-o-k@yandex.ru

²СПб ГУ, г. Санкт-Петербург, Россия

Прогнозирование вспышек в активных областях Солнца – актуальная задача Солнечной физики и Солнечно-Земных связей. Существует несколько предположений о механизме Солнечных вспышек. Один из них связан со всплытием нового магнитного потока (и дальнейшим перезамыканием силовых магнитных линий) – хорошо индицируется методом, получившим название Критерий Танака-Еноме (КТ-Е), в основе которого лежат спектрально-поляризационные наблюдения на микроволнах с высоким угловым разрешением. В оригинальной работе его авторов [1] КТ-Е был применен для мощных вспышечных событий (протонно-опасных), в дальнейшем [2] модернизирован и использован для прогнозирования более слабых событий. Преимущество наблюдений в микроволновом диапазоне для прогнозирования вспышек состоит в том, что он весьма чувствителен к изменениям магнитного поля и особенно эффективен в переходной области (хромосфера-корона) на высотах менее 10 тыс. км над фотосферой, что и позволяет заблаговременно обнаруживать всплытие нового магнитного потока. В данной работе исследуется корреляция между вспышками в рентгеновском диапазоне и их проявлениями в микроволновом диапазоне.

Работа выполнена в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-02-00045 «Диагностика параметров магнитосферы активной области», и Программой ОФН РАН П12 «Проблема самоорганизации солнечных структур (от нано вспышек до мощных вспышек) по данным широкодиапазонной радиоастрономии».

1. H. Tanaka and S. Enome, The Microwave Structure of Coronal Condensations and Its Relation to Proton Flares, Solar Physics, Volume 40, Issue 1, pp.123-131, 1975 г.

2. Bogod, V. M.; Svidskiy, P. M.; Kurochkin, E. A.; Shendrik, A. V.; Everstov, N. P. A Method of Forecasting Solar Activity Based on Radio Astronomical Observations, Astrophysical Bulletin, Volume 73, Issue 4, pp.478-486, 2018 г.

ОПЕРАТИВНЫЙ АНАЛИЗ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Калегаев В.В., Бобровников С.Ю., Нгуен М.Д., Мягкова И.Н., Шугай Ю.С.

Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
klg@dec1.sinp.msu.ru

Центр данных оперативного космического мониторинга (ЦДОКМ) НИИЯФ МГУ выполняет оперативный анализ радиационного состояния магнитосферы на основе данных наблюдений и моделирования. В автоматическом режиме функционирует программно-аппаратный комплекс, состоящий из подсистемы обращения к внешним источникам данных, подсистем расшифровки, первичной обработки и загрузки данных, системы управления базами данных, специализированного программного интерфейса для взаимодействия с базой данных, Web-сервера, операционных моделей и средств визуализации данных. Доступ к данным и результатам моделирования реализован через сайт (<http://swx.sinp.msu.ru/index.php>) который дает информацию об актуальных факторах космической погоды в режиме реального времени. Система регистрации потенциально-опасных ситуаций в околоземном космическом пространстве отслеживает четыре основных фактора космической погоды: рентгеновское излучение Солнца (IS3 GOES primary), Кр-индекс, протоны на геостационарной орбите с энергией выше 10 МэВ (IS3 GOES primary) и электроны ВРПЗ с энергией выше 0.6 МэВ (IS3 Электро-Л2). Важной особенностью системы является использование данных измерений российских метеорологических спутников Электро Л2 и Метеор М2. На основе данных измерений полярного IS3 «Метеор-М №2», разработаны операционные сервисы, предназначенные для раннего предупреждения возрастаний потоков солнечных протонов в полярных шапках, и возрастаний потоков электронов релятивистских и субрелятивистских энергий в области внешнего радиационного пояса Земли. Операционные сервисы системы космического мониторинга дают среднесрочные (1-4 суток) прогнозы скорости солнечного ветра и суточных флюенсов релятивистских электронов внешнего радиационного пояса, а также краткосрочные прогнозы (1-2 часа) геомагнитных индексов и параметров солнечного ветра.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 16-17-00098.

ОПЕРАТИВНЫЙ МОНИТОРИНГ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН И ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНОВ ДЛЯ КВ РАДИОСИСТЕМ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Рогов Д.Д.

ФГБУ «ААНИИ», г. Санкт-Петербург, Россия, rogovdenis@mail.ru

Высокоширотная ионосфера, особенно в возмущенных геофизических условиях, обладает существенной неоднородностью. Поэтому для уверенного определения условий функционирования любых КВ радиосистем в этом регионе необходим мониторинг ионосферы и условий распространения радиоволн.

Для исследования ионосферы в Арктическом регионе РФ развернута сеть наклонного зондирования в КВ диапазоне частот, оборудованная современными цифровыми ионозондами с линейно-частотной модуляцией.

Разработаны алгоритмы, позволяющие в оперативном режиме проводить обработку данных наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) и выводить рекомендации по использованию частотного диапазона и условиям распространения ДКМ радиоволн. Определяются максимальные и наименьшие наблюдаемые частоты сигналов на ионограммах НЗИ, а также модовая структура сигналов в различных частотных диапазонах. Предложенный вариант дополнен статистикой за последние двое суток, а также оценкой вероятности связи в любом диапазоне на отдельной радиотрассе.

Производится разделение отражений от E- и Es-слоев ионосферы для определения параметров спорадических слоев, характерных для высоких широт и оказывающих значительное влияние на работу систем КВ связи и радиолокации в Арктике.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-05-80004.

1. Рогов Д.Д., Выставной В. М. Исследование параметров распространения декаметровых радиоволн на сети трасс наклонного зондирования ионосферы в арктическом регионе РФ // Мир измерений. 2014. Т. 7. С. 20-26.

2. Rogov D.D. Study of the sporadic Es layers occurrence probability based on the ionospheric oblique sounding network data in the Russian Arctic region. Conference Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW) 2019, DOI:10.1109/RSEMW.2019.8792696.

Планетарное распределение поглощенной дозы ионизирующего излучения по результатам эксперимента ДЭПРОН

Золотарев И.А.¹, Бенгин В.В.^{1,2}, Юшков Б.Ю.¹, Нечаев О.Ю.¹, Панасюк М.И.^{1,3}, Петров В.Л.¹, Яшин И.В.¹

¹ НИИЯФ МГУ, zolotarev@sinp.msu.ru

² ИМБП РАН,

³ Физический факультет МГУ им. Ломоносова

Данное исследование направлено на изучение особенностей радиационной обстановки на спутнике Ломоносов. Выделен вклад в суточную поглощенную дозу различных участков траектории спутника и, таким образом, построено планетарное распределение поглощенной дозы в ходе эксперимента. Планетарное распределение разбито на области пространства, содержащие внешний радиационный пояс, внутренний радиационный пояс, приэкваториальные области между поясами и полярные шапки. Каждая из областей проявляет существенно различную динамику накопления дозы. Показано, что суточная доза во внешнем радиационном поясе испытывает изменения от 0,2 мГр до 3,5 мГр за защитой 0,65 г/см² (от 0,01 мГр до 0,013 мГр для нижнего детектора за защитой 0,9 г/см²).

Поглощенная доза, накопленная за прохождение Южно-Атлантическая Аномалия (ЮАА) также испытывает значительные изменения, но в сторону меньших значений, что обусловлено различием траекторий пересечения ЮАА в различные дни.

ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ПО РЕНТГЕНОВСКОМУ ИЗЛУЧЕНИЮ ВСПЫШЕК

Очелков Ю.П., Буров В.А.

ИПГ, РОСГИДРОМЕТ, г. Москва, Россия, yur_och@mail.ru

Исследуется зависимость максимальной интенсивности СПС $J_{p,max}$ (в диапазоне энергий 30- 100 МэВ) от параметров рентгеновских вспышек Солнца в диапазоне длин волн 0.1-0.8 нм по данным наблюдения КА GOES в 23 цикле солнечной активности.

Показано, что предельная точность прогноза $J_{p,max}$ по электромагнитному излучению вспышек вряд ли возможна с ошибкой меньшей, чем порядок величины. Показывается, что $J_{p,max}$ зависит не только от максимального потока рентгеновских вспышек, но и от их временного развития на фазе роста. Показано, что такой параметр рентгеновских вспышек как $P = (T_{r,l}/60 + 0.35 * (Lg(J_{x,max}) + 3)) * 10 + 2$, где $J_{x,max}$ поток рентгеновского излучения в максимуме в Вт/м², а $T_{r,l}$ ($T_{r,l}$ в минутах) - средняя ширина временного профиля рентгеновской вспышки в логарифмических координатах на фазе роста в диапазоне значений потока от $J_{x,max}/10$ до $J_{x,max}$, может служить прогностическим параметром при прогнозе факта появления СПС и его интенсивности. Приводится способ вычисления параметра $T_{r,l}$ для случаев, когда рентгеновская вспышка не наблюдается в указанном диапазоне из-за высокого фона или наложения излучения от других вспышек. В случае наличия изломов во временном ходе рентгеновского излучения для нахождения P предлагается использовать параметр временного развития t_l (см.[1]). Показано также, что распределение рентгеновских вспышек по параметру P является степенным с тем же показателем степени, что и распределение СПС по интенсивности в максимуме в логарифмических координатах. Это означает, что логарифм интенсивности солнечных протонных событий пропорционален параметру P : $Lg J_{p,max} = A * P$, где A фиксированное число. Это соотношение позволяет существенно улучшить прогноз максимальной интенсивности СПС.

1. Очелков Ю.П. Скейлинг временного развития всплесков мягкого рентгеновского излучения Солнца на фазе роста. Гелиогеофизические исследования, 2016, 15, с. 1 – 31.

РОБОТИЗИРОВАННАЯ ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА ЗАГОРИЗОНТНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ МОЩНОГО ИСТОЧНИКА АКТИВНОСТИ НА СОЛНЦЕ

Козлов В.И.

Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера, СО РАН,
г. Якутск, cosmoprognoz@mail.ru

Для обнаружения *невидимого с Земли* источника активности на Солнце США осуществили запуск на специальную орбиту два весьма дорогостоящих космических аппарата Stereo-A и Stereo-B. Ту же самую задачу **загоризонтного** обнаружения мощного источника активности ЗА лимбом Солнца в *реальном* времени, мы решаем дистанционным методом диагностики околоземного космического пространства, посредством созданной (<http://www.forshock.ru/pred.html>) роботизированной экспертной системы Cyber-FORSHOCK на базе уже существующей мировой сети (высокоширотных) станций космических лучей (<http://www.nmdb.eu>). В нашем случае, планета Земля, вместе с работающими на прием космической радиации высокоширотными нейтронными мониторами (порядка ~10), представляет собой ЕДИНЫЙ «прибор»!

По сравнению с предыдущими сообщениями, в настоящем докладе, практически вдвое увеличено число событий загоризонтного обнаружения мощного источника активности на Солнце по эффекту «гало» в космических лучах в режиме *реального* времени.

Сделан вывод, 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 *непосредственных наблюдений* взаимодействия ударных волн от серии СМЕ на космических аппаратах.

КРАТКОСРОЧНОЕ И СРЕДНЕСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ УСЛОВИЙ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Широкий В.Р., Ефиторов А.О., Мягкова И.Н., Шугай Ю.С., Баринев О.Г., Доленко С.А.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, dolenko@srd.sinp.msu.ru

Прогнозирование состояния магнитосферы Земли, в том числе вариаций потока релятивистских (с энергией выше 2 МэВ) электронов внешнего радиационного пояса Земли на геостационарной орбите, представляет собой весьма сложную задачу, одним из эффективных методов решения которой является использование различных методов машинного обучения [1], в том числе искусственных нейронных сетей, «случайного леса», градиентного бустинга и т.п. При этом входной массив данных представляет собой многомерный временной ряд, компонентами которого, помимо потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли, как релятивистских, так и субрелятивистских, являются параметры солнечного ветра, межпланетного магнитного поля и показатели состояния магнитосферы - геомагнитные индексы, а прогнозируемым значением является значение рассматриваемой переменной состояния магнитосферы Земли в интересующий момент времени в будущем. Естественно, что чем дальше по времени простирается прогноз, осуществляемый с приемлемой точностью (чем больше горизонт прогноза), тем более он востребован.

Под краткосрочным прогнозом в данной работе понимается прогнозирование среднечасовых потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли с горизонтом от одного до 24 часов, под среднесрочным - прогноз суточных флуенсов (интегральных потоков) релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли с горизонтом 1-4 суток. В работе показано, что точность прогноза потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса Земли на трое-четверо суток вперед существенно возрастает при добавлении в обучающие параметры прогнозируемых значений скорости солнечного ветра на околоземной орбите, полученных на основе обработки изображений Солнца в УФ диапазоне с инструмента AIA обсерватории SDO.

В работе обсуждаются преимущества различных наборов входных данных и алгоритмов прогнозирования, а также оптимальные методы их применения.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик НИИЯФ МГУ 6.1 (01201255512) и 2.1 (115041410195).

1. Machine learning techniques for space weather. Eds. E. Camporeale, S.Wing, J. R. Johnson. Elsevier Inc., 2018.

AURORAL OMEGA BANDS ARE A SIGNIFICANT CAUSE OF LARGE GEOMAGNETICALLY INDUCED CURRENTS

Apatenkov S.V., Pilipenko V. A., Gordeev E. I., Viljanen A., Juusola L., Belakhovsky V. B., Sakharov Ya. A., Selivanov V. N.

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

В течение магнитной бури 28-29 июня 2013 на трансформаторе в пос. Выходной Мурманской области были зарегистрированы сильнейшие за весь период наблюдений геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ), интенсивность достигала 120 А. В этом же MLT секторе, в южном полушарии УФ имаджеры низковысотных спутников DMSP наблюдали авроральные омега-структуры. По данным наземных магнитометров сети IMAGE в ионосферной динамике видны последовательности дрейфующих на восток со скоростями 0.5-2.5 км/с токовых вихрей. Несмотря на почти постоянную интенсивность токов в каждом отдельном вихре, наблюдаются высокие значения ГИТ и производных магнитного поля, они создаются за счет быстрого азимутального движения этих вихрей.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект №19-77-10016

ЭФФЕКТЫ ДЕСТРУКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ

Вахнина В.В.⁽¹⁾, Кувшинов А.А.⁽¹⁾, Селемир В.Д.⁽²⁾, Карелин Д.И.⁽²⁾

⁽¹⁾ТГУ, г. Тольятти, Россия, VVVahnina@yandex.ru

⁽²⁾РФЯЦ-ВНИИЭФ, г.Саров, Россия, selemir@vniief.ru

Проектирование и эксплуатация электрических сетей высокого напряжения осуществляется с учетом климатических факторов внешней среды (температура, влажность и давление воздуха, дождь, ветер, пыль, соляной туман, иней и др). С развитием и усложнением топологии электрических сетей возрастает влияние еще одного фактора внешней среды, а именно геомагнитных возмущений, вызывающих протекание по обмоткам высокого напряжения и фазным проводам линий электропередач квазипостоянных (частота менее 0,1 Гц) геоиндуцированных токов (ГИТ) и возникновение ряда деструктивных эффектов.

1. Наиболее интенсивному воздействию ГИТ подвержены силовые трансформаторы (СТ): тупиковых подстанций при совпадении трассы воздушных линий электропередачи с направлением геоэлектрического поля; узловых подстанций, если трассы примыкающих воздушных линий электропередачи имеют различное географическое направление, одно из которых совпадает с направлением геоэлектрического поля. Практически не подвержены воздействию ГИТ силовые трансформаторы проходных подстанций, если географическое направление воздушных линий электропередачи до и после подстанции остается неизменным

2. В СТ со стержневой магнитной системой (ТРДН-63000/115/6,3/6,3) среднее значение индукции в крайних стержнях достигнет порога насыщения ($\approx 1,66$ Тл) при увеличении ГИТ примерно до 700 А. Для полного насыщения стержневой магнитной системы, включая и центральный стержень, величина ГИТ должна возрасти до 1186 А. В СТ с бронестержневой магнитной системой (на примере ТДЦ-400000/220/20) уже при ГИТ величиной 10 А среднее значение магнитной индукции боковых ярм достигает значения насыщения. Насыщение крайних стержней произойдет при величине ГИТ равной 450 А, а полное насыщение магнитной системы, включая и центральный стержень, наступит при величине ГИТ, равной 1130 А.

3. Деформация тока намагничивания под воздействием ГИТ, который приобретает практически однополярную форму и появляются высшие гармоники, как четных, так и нечетных порядков. При фазовом угле насыщения магнитной системы 180 гр. основная гармоника тока намагничивания достигает предельного значения и в $(283 \div 316)$ раз превышает паспортное значение тока холостого хода силового трансформатора. При фазовом угле насыщения магнитной системы 90 гр. амплитуда второй гармоники достигает $\approx 43\%$ амплитуды основной гармоники.

4. Под воздействием ГИТ возникают дополнительные потери активной мощности, которые ограничивают нагрузочную способность СТ. Например, для ТДЦ-400000/220 при величине ГИТ ≈ 30 А и температуре окружающего воздуха 20°C допустима перегрузка не более 42%, а при 40°C – не более 28%. Увеличение нагрузочной способности выше установленных значений может привести к перегреву обмоток силового трансформатора.

5. Уменьшение индуктивного сопротивления намагничивания СТ по мере возрастания ГИТ вызывает уменьшение предела передаваемой мощности межсистемной электропередачи. Возможно снижение предела передаваемой мощности на $(10,7 \div 83,8)\%$. При фазовом угле насыщения более 50 гр. прекращается транзит реактивной мощности, способный инициировать развитие аварийной ситуации типа «лавина напряжения».

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ ГИТ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ

Сахаров Я.А.¹, Селиванов В.Н.², Билин В.А.¹

¹ Полярный геофизический институт, г. Мурманск; Россия, sakharov@pqia.ru

² Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

Непрерывная регистрация геоиндуктированных токов (ГИТ) на подстанциях магистральных электрических сетей на Северо-Западе России ведется более десяти лет. Анализ амплитудных значений ГИТ в узлах энергосистемы позволяет на фоне относительно гладких закономерностей выделить экстремальные события, случаи с максимальными амплитудами токов. Именно эти, экстремальные события, могут оказаться наиболее опасными для устойчивой работы энергосистем. В работе рассмотрены случаи развития ГИТ максимальных амплитуд в узлах магистральной линии электропередачи «Северный транзит» при различных геомагнитных возмущениях. Обсуждается связь событий ГИТ с условиями, влияющими на генерацию токов в энергосистеме, а именно величиной геомагнитного возмущения, скоростью изменения горизонтальной компоненты геомагнитного поля, параметрами линии электропередачи. Работа выполнена при поддержке ЕС в рамках программы FP7/2007–2013, грант n260330 и Российским фондом фундаментальных исследований, проект р-а № 17-48-510199.

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА И ЗАЩИТЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ

Вахнина В.В., Черненко А.Н., Федяй О.В.

ТГУ, г. Тольятти, Россия, tchernenko83@yandex.ru

На современных подстанциях и электростанциях электроэнергетических систем (ЭЭС), вновь строящихся или реконструируемых, устанавливаются системы мониторинга, которые непрерывно контролируют параметры электрооборудования, в том числе и состояние силовых трансформаторов (СТ). Однако системы мониторинга аварийных ситуаций, устанавливаемые в России, не интегрированы с устройствами релейной защиты и автоматики (РЗА). Поэтому сигналы из системы мониторинга не могут быть переданы на отключение электрооборудования. Также следует отметить, что существующие системы РЗА не защищают электрооборудование ЭЭС от воздействия геоиндуцированных токов (ГИТ). В списке классификационных признаков, включенных в «Инструкцию по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных, электрических и тепловых сетей» и в «Правилах расследования причин аварий в электроэнергетике» отсутствует влияние ГИТ на режимы работы ЭЭС. Поэтому алгоритмы функционирования существующих устройств релейной защиты и автоматики не предусматривают возможности присутствия ГИТ в ЭЭС, что может привести к несрабатыванию защит и развитию системных аварий.

Разработана методика определения наиболее уязвимых относительно воздействия ГИТ силовых трансформаторов подстанций и электростанций, в которых наиболее целесообразна регистрация и оценка опасных уровней ГИТ. Методика учитывает топологию электрической сети и географические направления линий электропередач [1]. Разработан алгоритм идентификации состояния насыщения магнитных систем СТ подстанций и электростанций при воздействии ГИТ. При насыщении магнитной системы силовых трансформаторов ток намагничивания многократно возрастает по величине, приобретает практически однополярную форму, имеет сложный гармонический состав, включая четные гармоники [2], поэтому наряду с мониторингом постоянного тока в нейтрали СТ предлагается контроль коэффициентов искажения синусоидальности кривой тока в обмотках высокого и низкого напряжения.

Мониторинг ГИТ в нейтралях силовых трансформаторов и регистрация искажений синусоидальности кривых тока позволяет синтезировать новые алгоритмы защиты трансформаторного оборудования ЭЭС. Например, в отечественных и зарубежных микропроцессорных терминалах РЗА в дифференциальных токовых защитах (ДЗТ) силовых трансформаторов реализована блокировка по 2-й и 5-й гармоникам тока, исключающая возможность срабатывания защиты при воздействии ГИТ. При реализации нового алгоритма функционирования ДЗТ в случае идентификации состояния насыщения магнитной системы силового трансформатора будет минимизировано время действия блокировок, что позволит повысить устойчивость функционирования ЭЭС при деструктивном воздействии ГИТ.

1. Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А. // Промышленная энергетика 2019. № 5. С. 17-25.

2. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Крюковский М.П. // Промышленная энергетика 2016. № 12. С. 43-49.

УЯЗВИМОСТЬ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ К ВОЗДЕЙСТВИЮ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ

Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Бычков А.В.

ТГУ, г. Тольятти, Россия, alekseikuvshinov@yandex.ru

Главная схема электрических соединений практически всех типов электростанций (тепловых, атомных, гидравлических) строится по блочному принципу. В обычных условиях эксплуатации режим работы магнитной системы блочного трансформатора (БТ) не выходит за пределы области рабочего перемагничивания электротехнической стали и практически не оказывает влияния на функционирование синхронного генератора в части генерации реактивной мощности. Например, простой блок «генератор ТВВ-320 – трансформатор ТДЦ-400000/220» в номинальном режиме генерирует реактивную мощность, величина которой практически на два порядка превышает мощность намагничивания блочного трансформатора. Указанное соотношение между уровнем генерации реактивной мощности и величиной мощности намагничивания может радикально измениться в периоды геомагнитных возмущений, когда по обмоткам высокого напряжения блочного трансформатора начинают протекать квазипостоянные геоиндуцированные токи (ГИТ), вызывающие одностороннее насыщение магнитной системы [1].

В результате одностороннего насыщения магнитной системы ток намагничивания блочного трансформатора приобретает практически униполярную форму и полный спектр высших гармоник (2-й, 3-й, 4-й, 5-й, 6-й и т.д.) на фоне многократного увеличения основной гармоники [2]. Наиболее характерным индикатором смещения режима перемагничивания в область технического насыщения служат именно четные гармоники тока намагничивания, из которых наиболее значимой является вторая гармоника.

Количественные оценки, иллюстрирующие механизм воздействия ГИТ на синхронные генераторы, получены на примере численного моделирования реального укрупненного блока, в состав которого входят два синхронных генератора типа СВФ-1285/275-42У4 и группа однофазных трансформаторов типа ОРНЦ-533000/525/15,75. Активизация геомагнитных возмущений начинает оказывать влияние на работу блока при достижении некоторого порогового уровня интенсивности, достаточного для возбуждения в обмотках высокого напряжения БТ квазипостоянных ГИТ. Индикатором насыщения магнитной системы блочного трансформатора служит появление в цепи статорных обмоток синхронного генератора 2-й гармоники тока. При этом происходит увеличение тока статора в 2,3 раза за счет роста реактивной составляющей тока. Создаются условия для срабатывания защиты генератора от симметричной перегрузки, уставкой которой обычно выбираются в диапазоне $(1,3 \div 1,4)$ номинальной величины тока статора. Гармоники тока намагничивания блочного трансформатора, возникающие при одностороннем насыщении магнитной системы под воздействием ГИТ и образующие прямую или обратную последовательности, трансформируются в цепи статорных обмоток синхронного генератора. Гармоники токов намагничивания нулевой последовательности замыкаются в обмотках низкого напряжения блочного трансформатора, соединенных в треугольник, по статорным обмоткам синхронного генератора не протекают. Наиболее значимой является 2-я гармоника тока в цепи статорных обмоток, которая к моменту максимума интенсивности геомагнитных возмущений достигает 53% номинальной величины статорного тока, создавая угрозу срабатывания защиты обратной последовательности с типичным диапазоном уставок $(0,3 \div 0,7)$ номинального тока.

1. Wik M., Viljanen A., Pirjola R., Pulkkinen A., Wintoft P., Lundsted H. // Space weather 2008. V. 6.

2. Сивоконь В.П., Сероветников А.С., Писарев А.В. // ЭЛЕКТРО. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность 2011. № 3. С. 30-34.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ ТОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ СИЛОВОГО ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ ЕГО ПОДМАГНИЧИВАНИИ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫМ ТОКОМ

Воеводин С.В.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия, voevodin@ntc.vniief.ru

Известно, что геоиндуцированный ток, проникая в электросеть высокого напряжения через системы заземления электростанций и подстанций, вызывает дополнительное подмагничивание сердечника силового трансформатора постоянным магнитным полем. Такое воздействие оказывает негативное влияние на устойчивость передачи электроэнергии и может привести к термической перегрузке трансформатора.

С использованием методов анализа нелинейных радиотехнических цепей [1] проведено аналитическое исследование процесса одновременного возбуждения магнитного поля в силовом однофазном трансформаторе переменным сетевым и постоянным геоиндуцированными токами. Показано, что для анализа сильно нелинейного режима в цепи возбуждения трансформатора целесообразно применить кусочно-линейную аппроксимацию вебер-амперной характеристики катушки с ферромагнитным сердечником. Тогда сигнал тока возбуждения можно представить как $i(t) = I_m(\gamma_0(\theta) + \gamma_1(\theta)\cos\omega t + \gamma_2(\theta)\cos 2\omega t + \dots + \gamma_k(\theta)\cos k\omega t)$, где I_m – амплитуда тока в катушке при отсутствии сердечника, θ – угол отсечки, γ_k – функции Берга, ω – угловая частота синусоидального напряжения на катушке. Для диапазона углов отсечки от 0 до $\pi/2$ найдена аппроксимация $\theta = \arccos(1 - (\pi I_0/I_m)^{2/3})$, определяющая в явном виде зависимость угла отсечки от величины постоянной составляющей тока $I_0 = I_m\gamma_0(\theta)$. Полученные выражения с приемлемой точностью описывают результаты [2] экспериментов по воздействию постоянного тока на однофазные трансформаторы мощностью 370 МВ·А и 550 МВ·А.

В результате анализа показано, что только небольшая часть $\sim 1\%$ геоиндуцированного тока непосредственно подмагничивает сердечник однофазного трансформатора высокого напряжения. Остальная часть этого тока создает магнитный поток вне сердечника. Данное условие можно применить при расчете переходного процесса в трансформаторе, вызванного импульсным воздействием геоиндуцированного тока.

1. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы // М.: «Советское радио», 1977.
2. Picher P., Bolduc L., Dutil. A., Pham V.Q. // IEEE Transactions on Power Delivery 1997, v. 12, no. 1, pp. 257 – 263.

ВКЛАД СУББУРЕВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В РОСТ ГЕОМАГНИТНО-ИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ В ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

В.Б. Белаховский¹, В.А. Пилипенко^{2,3}, Я.А. Сахаров¹, В.Н. Селиванов⁴

¹ – Полярный геофизический институт, г. Апатиты

² – Институт физики Земли РАН, г. Москва

³ – Геофизический центр РАН, г. Москва

⁴ – Центр физико-технический проблем энергетики Севера КНЦ РАН, г. Апатиты

В данной работе произведена оценка вклада суббуравых геомагнитных возмущений в рост геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ), регистрируемых в линиях электропередач на Кольском полуострове и в Карелии, во время магнитных бурь. Система регистрации ГИТ создана Полярным геофизическим институтом совместно с ЦФТПЭС КНЦ РАН и является единственной в России. Система регистрации ориентирована преимущественно в направлении север-юг. Для регистрации геомагнитных возмущений использованы данные магнитометров IMAGE. Показано, что рост ГИТ определяется суммарным вкладом как вихревых токовых систем, так и аврорального электроджета. В отдельных случаях может преобладать вклад аврорального электроджета, в других случаях – вклад вихревых токовых систем. Поэтому ГИТ представляют опасность для технологических систем, ориентированных как в направлении восток-запад, так и в направлении север-юг. Різ пульсации на фоне суббури с вихревой структурой ионосферных токовых систем способны приводить к дополнительному росту величины ГИТ. Поэтому генерация интенсивных ГИТ в значительной степени связана не с глобальными геомагнитными возмущениями большой амплитуды, а с локальными быстрыми вариациями сравнительно небольшой амплитуды, наложенными на глобальные возмущения. Пространственно-временное распределение максимума геомагнитных возмущений не всегда совпадает с пространственно-временным распределением максимума производной dX/dt . Поэтому проблема предсказания ГИТ далеко не всегда сводится к предсказанию мощного геомагнитного возмущения.

ВЛИЯНИЕ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРАХ

Лхамдондог А.Д.¹, Монаков Ю.В.¹, Гусев Ю.П.¹, Ягова Н.В.², Пилипенко В.А.²

¹НИУ МЭИ, ²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, LkhamdondogA@mail.ru

Геомагнитные возмущения различной интенсивности, возникающие вследствие воздействия факторов космической погоды, возбуждают в электроэнергетических системах геоиндуцированные токи (ГИТ). Их негативное воздействие на работу электрооборудования было зафиксировано в различных странах [1]. Так в 1989 году в Канаде, провинции Квебек произошла крупная авария с каскадным отключением линий электропередачи и силовых трансформаторов, что вызвало перерыв в электроснабжении на 9 часов. Максимальные значения ГИТ были измерены в системах, расположенных в северных широтах. Например, в Швеции был зафиксирован ток амплитудой 300 А [2].

ГИТ представляет собой знакопостоянный ток, расположенный в диапазоне частот от 1 до 10 мГц, продолжительность протекания которого может составить от нескольких минут до нескольких часов. В электроэнергетических системах опасному воздействию ГИТ опасности подвержены преимущественно силовые трансформаторы, имеющие заземленную нейтраль, высоковольтные обмотки которых вместе с линиями электропередачи большой протяженности образуют контур для протекания ГИТ в них. В ранее проведенных исследованиях явление протекания ГИТ в обмотках силового трансформатора рассматривалось в установившихся режимах без учета переходных процессов.

При протекании ГИТ наряду с периодической составляющей возникает дополнительное намагничивание силового трансформатора. Продолжительное намагничивание может привести к насыщению магнитопровода трансформатора, искажая кривую тока и изменяя гармонический состав токов обмоток. В зависимости от амплитуды и продолжительности воздействия ГИТ изменяется время до насыщения трансформатора [3]. Процессы намагничивания наиболее ярко проявляются при включении трансформатора на холостом ходу. При включении трансформатора за счет резкого увеличения напряжения возникают броски намагничивающих токов (БНТ). Кроме того, при оперативных переключениях в магнитопроводе появляется остаточная намагниченность, которая при повторных включениях может привести к дополнительному росту БНТ.

Исследования влияния ГИТ были проведены в программном комплексе *EMTP-RV* (*PowerSys*, Франция) с учетом явления гистерезиса. Возникновение остаточной намагниченности, увеличение амплитуд БНТ отдельных фаз, а также изменение гармонического состава токов может стать причиной неправильной работы дифференциальных релейных защит. Ложные срабатывания и несрабатывания защит могут привести к аварийным ситуациям и отключению электроснабжения отдельных потребителей. Соответственно для обеспечения бесперебойной работы электроэнергетических систем необходимо учитывать протекание ГИТ в обмотках силовых трансформаторов не только в установившихся режимах, но и при переходных процессах в нормальных и аварийных режимах.

1. Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the earth's surface. // *Adv. Space Res.* Vol. 22, No. 1, pp. 17-27, 1998.

2. Wik M., Viljanen A., Pirjola R., Pulkkinen A., Wintoft P., Lundstedt H. Calculation of geomagnetically induced currents in the 400 kV power grid in southern Sweden. *Space weather*, Vol. 6, S07005.

3. Гусев Ю.П., Лхамдондог А.Д., Монаков Ю.В., Ягова Н.В. Влияние знакопостоянного тока на процессы намагничивания трехфазных силовых трансформаторов. *Электричество* №9, 2019.

ВЛИЯНИЕ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА СОДЕРЖАНИЕ ГАРМОНИК В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Селиванов В.Н., Сахаров Я.А.

ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия, v.selivanov@ksc.ru

Кольский научный центр РАН совместно с Полярным геофизическим институтом с 1986 г. проводит работы по исследованию влияния геомагнитных бурь на состояние электрических сетей и трансформаторных подстанций на Кольском полуострове и в Карелии. Создана региональная система мониторинга токов в нейтралях трансформаторов, накопившая значительный массив информации о влиянии геомагнитных возмущений на электрическую сеть протяженностью 800 км (<http://eurisgic.org>).

Система мониторинга геоиндуцированных токов (ГИТ) измеряет квазипостоянные токи в нейтралях трансформаторов, а также оценивает содержание высших гармоник в сети. Каждые 0,1 с записываются следующие составляющие полного тока в нейтрали: постоянная составляющая, несущая информацию непосредственно о ГИТ; амплитудные значения токов первой, второй и третьей гармоник, которые позволяют оценить изменение гармонического состава полного тока в нейтрали при протекании ГИТ значительной амплитуды. Кроме того, регистрируются мгновенные значения токов в нейтралях при высоких значениях ГИТ. Эти данные дают информацию об амплитудах гармоник выше третьей.

В нормальном режиме токи гармоник нулевой и обратной последовательностей пренебрежимо малы, поэтому можно считать, что их рост обусловлен только насыщением магнитопровода автотрансформатора, вызванным геоиндуцированным током.

В ходе исследований влияния квазипостоянных токов в нейтрали на насыщение магнитопровода трансформатора выявлено неоднозначное изменение содержания высших гармоник: с ростом величины ГИТ возможно как увеличение, так и уменьшение амплитуды гармоник. Такое поведение гармоник обусловлено нелинейностью вольтамперной характеристики силового трансформатора и нуждается в дальнейших исследованиях процесса насыщения магнитопроводов при подмагничивании постоянным током. Насыщение магнитопроводов приводит к нарушениям симметрии передачи энергии по фазам, появлению высших гармоник, перегреву стали сердечников, росту вибраций конструктивных элементов, и в конечном итоге, к ускоренному старению изоляции силовых трансформаторов. Кроме того, геомагнитное воздействие носит кумулятивный эффект, снижая срок службы трансформатора. В итоге, при наиболее опасных геомагнитных возмущениях возможно возникновение серьезных аварий в электрических сетях, подобных тем, что произошли в конце прошлого века в пик геомагнитной активности в северных районах США и Канады, а также в Скандинавии.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 17-48-510199 р_север_а), а также Программы приграничного сотрудничества Коларктик 2014-2020 (проект КО2011 ARINKA - Инфраструктура арктических железных дорог в регионе Коларктик).

ГЕОИНДУЦИРОВАННЫЕ ТОКИ В ПРОВОДЯЩИХ СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗЛОМАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Новиков В.А., Сорокин В.М., Ященко А.К., Ружин Ю.Я., Ключкин В.Н.

ОИВТ РАН, г. Москва, Россия, novikov@ihed.ras.ru

Известно, что импульсы электрического тока, подаваемого в земную кору от искусственных источников (импульсного МГД-генератора "Памир-2" или электроимпульсной установки ЭРГУ-600), могут вызывать рост трещинообразования в горных породах и даже инициировать сейсмические события [1], что приводит к пространственно-временному перераспределению региональной сейсмической активности. Данные результаты полевых экспериментов на Памире и Северном Тянь-Шане подтверждены в лабораторных экспериментах на прессовом оборудовании и пружинно-блочных моделях, имитирующих сейсмогенный разлом, когда импульсы электрического тока приводят либо к резкому росту акустической эмиссии из исследуемого образца (трещинообразованию) или к инициированию макрособытия - лабораторного землетрясения на пружинно-блочной модели [2].

С учетом установленного отклика сейсмичности на искусственные электромагнитные воздействия встает вопрос о возможности инициирования землетрясений такими природными явлениями, как солнечные вспышки и магнитные бури, который в настоящее время является дискуссионным [3]. Одним из наиболее существенных проявлений космической погоды являются электрические геомагнитно-индуцированные токи (ГИТ), возбуждаемые в поверхностных слоях Земли и проводниках при резких изменениях геомагнитного поля. Поскольку ГИТ представляют собой опасность для трубопроводов, магистральных кабельных линий, высоковольтных ЛЭП, железнодорожного оборудования, морских и наземных коммуникационных кабелей, это явление в настоящее время достаточно хорошо изучено для проводящих технических объектов развитой инфраструктуры. Практически неизученными являются ГИТ в проводящих разломных зонах земной коры, а также их воздействие на деформационные процессы в земной коре. Следует отметить, что вследствие насыщенности разломов земной коры высокоминерализованными флюидами или графитизации разлома (образование тонких графитовых пленок на бортах разлома в результате предыдущих землетрясений) его проводимость может на несколько порядков превышать проводимость вмещающих горных пород.

В данной работе с использованием модели [3] расчетными оценками показано, что при сильных возмущениях геомагнитного поля $\sim 10^2$ нТл плотность теллурических токов в проводящем разломе может достигать 10^{-6} А/м², что на порядок выше плотности тока, генерируемого в очагах землетрясений искусственными импульсными источниками постоянного тока, подаваемого в земную кору через заземленный электрический диполь. В лабораторных экспериментах по генерации тока в модельном разломе показано удовлетворительное соответствие численных и экспериментальных результатов. Таким образом, при определенных условиях (уровень напряженно-деформированного состояния разлома, его проводимость и ориентация) геоиндуцированные токи, возбуждаемые в разломах резкими вариациями геомагнитного поля, могут инициировать землетрясения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00962.

1. Zeigarnik V.A. et. al. // Geophys. Res. Abstr. 2018. V. **20**. EGU2018-15436-1.
2. Novikov V.A. et. al. // Earthq. Sci. 2017. V. **30**. P. 167.
3. Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Novikov V.A. // Earthq. Sci. 2017. V. **32**. P. 26.

ГЕОМАГНИТНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лхамдондог А.Д.¹, Пилипенко В.А.², Ягова Н.В.², Монаков Ю.В.¹, Гусев Ю.П.¹

¹НИИ МЭИ, ²ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, LkhamdondogA@mail.ru

Изменения геомагнитного поля во время геомагнитных бурь, авроральных суббурь и более локальных переходных процессов в системе магнитосфера-ионосфера и геомагнитных пульсаций большой амплитуды вызывают появление геоиндуцированных токов (ГИТ). Появление ГИТ в контурах, образованных линиями электропередач (ЛЭП), заземленными нейтральными и токами растекания в земной коре, может привести к сбоям в работе электрооборудования. Зафиксированные аварии и их последствия описаны в работах [1, 2]. Негативному влиянию наиболее подвержены силовые трансформаторы, высоковольтные обмотки которых имеют заземленную нейтраль. Протекание ГИТ через обмотку трансформатора может привести к насыщению магнитопровода трансформатора. Процессы насыщения могут вызвать сбои в работе релейных защит и снизить надежность электроэнергетических систем. При этом значения и продолжительность протекания ГИТ зависят от многочисленных факторов [3]. К ним относятся параметры магнитного поля в магнитосфере и ионосфере Земли, импеданс земной коры, зависящий от электрических свойств литосферы с учетом вертикальных и горизонтальных неоднородностей, спектрального состава и пространственных масштабов возмущений, а также характеристик электроэнергетических систем. При этом воздействие возмущения зависит не только от установленной конфигурации сети, но и от текущего состояния, включающего уровень нагрузки и наличие переходных процессов.

Таким образом, количественная оценка ГИТ в элементах конкретной сети требует совместных исследований геофизиков и энергетиков. Моделирование и прогноз последствий ГИТ представляют собой мультидисциплинарную задачу. Наиболее сложным для оценки и, вместе с тем, наиболее опасным является сочетание квазипостоянных токов природного происхождения и переходных процессов в трансформаторах. В условиях недостатка данных прямых измерений, необходимо оценить максимально возможные значения ГИТ и продолжительность их протекания по имеющимся удаленным измерениям, оценить возникающие при такой интерполяции ошибки, выявить участки сетей наиболее подверженные негативному воздействию ГИТ. При этом после предварительной оценки воздействия ГИТ на электрические сети, необходимо принять меры по ограничению влияния ГИТ на электроэнергетические системы, а также разработать нормативно-технический документ, учитывающий данное явление не только в процессе проектирования систем, но и во время эксплуатации оборудования.

1. Pulkkinen A., Pirjola R., Viljanen A. Statistics of extreme geomagnetically induced current events. Space weather, Vol. 6, S07001, 2008.

2. Boteler D.H., Pirjola R.J., Nevanlinna H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the earth's surface. // Adv. Space Res. Vol. 22, No. 1, pp. 17-27, 1998.

3. Ягова Н.В., Пилипенко В.А., Федоров Е.Н., Лхамдондог А.Д., Гусев Ю.П. Геоиндуцированные токи и космическая погода: параметры РiЗ пульсаций и вероятности появления надпороговых значений производных по времени горизонтальных компонент геомагнитного поля. Физика Земли, №5, с. 89-103, 2018 г.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ, ИНДУЦИРОВАННЫХ ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ ЯВЛЕНИЯМИ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ: МЕТОДОЛОГИЯ И ОПЫТ РАСЧЕТОВ ДЛЯ РЕГИОНА БРИТАНСКИХ ОСТРОВОВ

Маршалко Е.Е., Кругляков М.С., Кувшинов А.В.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, elena.e.marshalko@gmail.com

Взаимодействие плазмы, извергаемой в межпланетное пространство в результате корональных выбросов массы, с магнитосферой Земли приводит к мощным возмущениям геомагнитного поля (магнитным бурям и магнитосферным суббурям). В соответствии с законом Фарадея переменное во времени магнитное поле индуцирует электрическое поле, которое, в свою очередь, генерирует геоиндуцированные токи (ГИТ) в земле и технологических системах, таких как электрические сети и трубопроводы. Хорошо известно, что ГИТ являются одним из наиболее опасных явлений, влияющих на работу этих систем. Таким образом, моделирование пространственно-временной структуры геоэлектрических полей во время геомагнитных возмущений является ключевым фактором при оценке угрозы для технологических систем от космической погоды.

В данной работе мы представляем методологию, позволяющую производить моделирование приповерхностного электромагнитного поля Земли, используя трехмерные модели проводимости Земли и глобальные модели токовых систем в магнитосфере и ионосфере. Моделирование включает в себя следующие шаги: 1) комбинированное глобальное магнитогидродинамическое моделирование земной магнитосферы и электростатическое моделирование ионосферы при помощи программного средства Space Weather Modeling Framework [Toth et al., 2005] на основе спутниковых данных солнечного ветра; 2) расчет вариаций внешнего магнитного поля у поверхности Земли при помощи программного средства CalcDeltaB [Rastaetter et al., 2014] на основе полученных на первом шаге токовых систем; 3) расчет плотности эквивалентного тока на основе полученных вариаций внешнего магнитного поля [Ivannikova et al., 2018]; 4) Региональное трехмерное моделирование электромагнитных полей с использованием полученной эквивалентной токовой системы и трехмерной модели проводимости региона с использованием программы численного моделирования электромагнитных полей extrEMe [Kruglyakov et al., 2016], основанной на методе интегральных уравнений. Приводятся и обсуждаются результаты моделирования для региона Британских островов.

Список литературы:

- Ivannikova, E., Kruglyakov, M., Kuvshinov, A., Rastaetter, L., and Pulkkinen, A. (2018). Regional 3-D modeling of ground electromagnetic field due to realistic geomagnetic disturbances. *Space Weather*, 16(5), 476-500, doi:10.1002/2017SW001793.
- Kruglyakov, M., Geraskin, A., and Kuvshinov, A. (2016). Novel accurate and scalable 3-D MT forward solver based on a contracting integral equation method. *Computers & Geosciences*, 96, 208-217, doi:10.1016/j.cageo.2016.08.017.
- Rastaetter, L., Toth, G., Kuznetsova, M.M., and Pulkkinen, A.A. (2014). CalcDeltaB: An efficient post processing tool to calculate ground-level magnetic perturbations from global magnetosphere simulations. *Space Weather*, 12, 553-565, doi:10.1002/2014SW001083.
- Toth, G., et al. (2005). Space Weather Modeling Framework: A new tool for the space science community. *J. Geophys. Res.*, 110, doi:10.1029/2005JA011126.

Связь интеллектуальной возбудимости пользователей сети Интернет с повышением солнечной активности

Ожередов В.А., Бреус Т.К.

Институт Космических Исследований РАН, Москва, Россия

Ранее неоднократно высказывалась гипотеза, что повышение солнечной активности способствуют активизации мышления больших популяционных групп. Многие авторы считают, что в разное время это приводило к войнам, революциям или же бурному развитию науки и искусства. Нашей задачей являлась проверка этой гипотезы в контексте влияния локальных всплесков геомагнитного Кр-индекса на активность пользователей научного форума <https://dxdy.ru>. Для этого мы исследовали частоты появления слов из определенных смысловых групп в сообщениях пользователей. Принадлежность слова к смысловой группе выяснялась при помощи специально разработанного нами алгоритма кластеризации связанных групп: слова U и V принадлежат одному кластеру, если существует цепочка $U \longleftrightarrow W_1 \longleftrightarrow W_2 \longleftrightarrow \dots \longleftrightarrow W_{n-1} \longleftrightarrow W_n \longleftrightarrow V$, такая, что расстояние Левенштейна между любыми двумя последовательными словами из них меньше заданного значения (у нас это двойка). Нами был разработан и протестирован программный бот, скачавший 11432 сообщений с 12 июня 2012 по 30 апреля 2018 года, которые содержат в общей сложности 2 290 609 осмысленных слов (знаки препинания, служебные символы, цифры и HTML-теги, а также стоп-слова типа предлогов и наречий были заранее отфильтрованы).

Было установлено, что корреляция между Кр-индексом геомагнитной активности и частотами появления слов из смысловых групп, относящихся к философскому осмыслению основных концепций квантовой механики, общей и специальной теории относительности в весеннее время повышается до 0.79, при этом максимумы числа сообщений по данным тематикам приходятся на дни пиковых значений Кр-индекса, достигающих от 4 до 6.

МЕТОДЫ МИНИМИЗАЦИИ РИСКОВ ПРИРОДНЫХ КАТАСТРОФ НА ПРИМЕРЕ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Соколова О.Н.

СПбПУ, г. Санкт-Петербург, Россия, sokolova.olga87@gmail.com

Согласно [1], явление характеризуется как катастрофа, если оно приводит к экономическому ущербу более чем 99 млн. долл. США, 20 погибшим или пропавшим без вести, 40 раненым, 2000 оставшимся без крова. Например, ураган Мэтью в 2016 году привел к экономическим потерям в размере 12,6 млрд. долл. США, 734 пострадавшим, оставил 150 тыс. человек без крова и 1 млн. потребителей без электроснабжения. Сильные геомагнитные бури (ГМБ) могут привести к сопоставимым потерям. Увеличение стоимости ущерба при системных авариях, вызванных ГМБ во многом усугублено ошибкой персонала вследствие отсутствия разработанных и внедренных методик минимизации рисков негативных эффектов при предупреждении и ликвидации явлений.

Принятый алгоритм оценки рисков состоит из пяти этапов: анализ, оценка, исследование/контроль, оповещение, наблюдение. На первом этапе составляется список рисков и неопределённостей, оценка которых, а также поиск путей уменьшения влияния неопределённостей производится на втором. На третьем этапе производится исследование и контроль мероприятий по минимизации рисков. Информирование участников мероприятий как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях реализуется на четвертом этапе. Постоянное наблюдение с целью корректировки составленного списка рисков/неопределённостей и разработанной системы мероприятий осуществляется в рамках пятого этапа. При определении комплекса мероприятий рекомендовано руководствоваться следующими принципами: прогнозирование, координация, коммуникация, подготовленность, непрерывность, интеграция. Доклад посвящен методам усовершенствования первого принципа – прогнозированию, направляемого на адекватную оценку рисков и разработку моделей прямых и косвенных воздействий.

Мероприятия по повышению качества прогнозирования ГМБ могут быть разработаны на основе стратегий для других природных явлений. Развитие средств и методов прогнозирования состоит из нескольких этапов: регистрация социально-экономических последствий, визуальные наблюдения, инструментальные наблюдения, создание синоптических карт, координирование прогнозирования в реальном времени в нескольких географически удаленных точках, субъективный анализ, объективный анализ. Можно различить два типа возмущений, приводящих к неустойчивой работе социотехнических систем, а именно: ординарные возмущения и экстремальные явления (black swan). Для каждой из этих групп существуют ограничения по средствам прогнозирования, особенно для экстремальных явлений. Предложено классифицировать ГМБ как идеальный шторм (perfect storm), что позволяет расширить спектр средств и повысить объективность прогноза ГМБ. Опыт минимизации последствий других явлений, характеризующихся как идеальный шторм, показал необходимость превентивной оценки зон высокого риска и разработки алгоритмов оценки, доступных для широкого применения. Пример такого алгоритма, основанного на анализе критических факторов разной природы, приведен в [2].

Наиболее сильной из зарегистрированных ГМБ (по ряду параметров) является так называемое событие Каррингтона в 1859 г., которое принято рассматривать в качестве эталонного ГМБ. Тем не менее, разработка мероприятий по минимизации менее сильных ГМБ не должна оставаться вне поля зрения профессионального сообщества с последующей эффективной коммуникацией между заинтересованными сторонами.

1. Sigma, Swiss Re // Swiss Re 2017.
2. Sokolova O., Burgherr P., Sakharov Ya., Korovkin N. // Space Weather 2018.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЗА ДЛЯ ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ (СТЕНД НПМ-01)

**Тренькин А.А., Буянов А.Б., Воеводин С.В., Горохов В.В., Долотов А.С., Карелин В.И.,
Коблова О.Н., Лимонов А.В., Перминов А.В., Селемир В.Д.**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия, alexey.trenkin@gmail.com

Исследования физических процессов, сопровождающих крупномасштабные явления в околоземном космическом пространстве (ОКП), например, таких как формирование и развитие радиационных поясов Земли, динамику плазменных образований, генерацию и распространение волн в магнитосферно-ионосферной плазме, весьма важны как с точки зрения получения фундаментальных знаний, так и в части их воздействия на техническую инфраструктуру. Ввиду сложности, высокой стоимости, а зачастую и невозможности осуществления натурных исследований, а также для верификации разрабатываемых расчетных методик, особую актуальность приобретает проведение соответствующего лабораторного моделирования.

В докладе представлено описание созданного в РФЯЦ-ВНИИЭФ лабораторного электрофизического стенда НПМ-01. Этот стенд является одним из крупнейших в своем роде в России и способен обеспечить моделирование широкого спектра процессов в ОКП, включая динамику плазменных образований, генерацию и распространение низкочастотных волн в замагниченной плазме и процессы в областях захваченной радиации.

Основными концептуальными элементами стенда, обеспечивающими условия физического моделирования электромагнитных плазменных процессов в ОКП, являются фоновое магнитное поле, фоновая замагниченная плазма и источники их возмущения. Вакуумная камера моделирования длиной более 7,5 м и диаметром 1 м находится внутри многосекционного соленоида, создающего в камере осесимметричное магнитное поле индукцией до 0,3 Тл. Система вакуумирования обеспечивает остаточное давление в камере при постоянной откачке на уровне 10^{-7} Тор. На стенде реализованы напуск и поддержание в камере моделирования заданного давления рабочего газа, в качестве которого могут выступать различные газы и их смеси. Для формирования фоновой замагниченной плазмы используется специально разработанный секционированный термокатод косвенного накала. Реализованные к настоящему времени параметры столба плазмы составляют: диаметр 0,2 м, длина 6 м, концентрация 10^{10} - 10^{12} см⁻³. В качестве факторов возбуждения нестационарных процессов в замагниченной плазме используются низкочастотные электромагнитные волны, пучки высокоэнергичных электронов и лазерная плазма.

Специфической особенностью стенда является возможности формирования в камере моделирования магнитного поля длительностью десятки секунд сложной пространственной конфигурации и изменяющегося во времени заданным образом, а также исследования динамики электродинамических плазменных процессов в таких условиях.

Продемонстрированы возможности стенда на примере моделирования генерации и распространения в замагниченной плазме магнитогидродинамических волн, а также движения пучка высокоэнергичных электронов наносекундного диапазона длительности в магнитной ловушке пробкотронного типа.

АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ ТОКОВ ПО ДАННЫМ МЕРИДИОНАЛЬНОЙ ЦЕПОЧКИ МАГНИТОМЕТРОВ

Евдокимова М.А., Петрукович А.А.

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

- В работе исследуются модели восстановления профиля западного электроджета по данным магнитного поля меридиональной цепочки магнитометров. Эта задача представляет интерес в связи с тем, что данные магнитного поля известны в конечном, довольно небольшом количестве точек. Сделан обзор существующих линейных моделей и показана их применимость на сетях IMAGE, CARISMA, магнетометрах на Ямале. В первой модели [1] токи представляются в виде бесконечно тонких проводов. Во второй [2] электроджет моделируется последовательностью узких бесконечно длинных полос. Оптимальной для сети IMAGE является модель с большим числом равномерно проводов (полос). Однако, большое число параметров (токов) приводит к большим ошибкам, и на более разреженной сети станций (Ямал или CARISMA) описанные методы плохо применимы. Для малого количества станций оптимальной является нелинейная модель с малым числом некоррелированных параметров. Была построена модель одной полосы с тремя параметрами и проведен ее тест на малом количестве станций. Показано, как положение станций относительно границ электроджета влияет на параметры модели. Ширина электроджета и плотность тока может варьироваться в зависимости от взятых станций, однако, полное значение тока меняется не сильно. Существенной проблемой использования нелинейной модели, особенно в случае сравнимого количества измеряемых величин и свободных параметров и наличии станций только по одну сторону электроджета, является «сваливание» алгоритма в локальный экстремум, который, как правило, находится далеко от абсолютного и имеет мало отношения к действительности. Для решения этой проблемы было проведено вычисление на случайном множестве начальных значений параметров, распределенных около априорного значения [3]. Правильный экстремум находится «большинством голосов» всех вариантов или по максимуму функции правдоподобия. Некорректная работа модели возможна в случае «плохого» расположения станций (когда Z-компонента измеренного магнитного поля имеет на всех станциях один и тот же знак, либо когда X- или Z-компоненты малы).

1. Kotikov A. L., Latov Yu. O., Troshichev O. A., Structure of auroral electrojets by the data from a meridional chain of magnetic stations, *Geophysica*, 1987, V. 23, P. 143-154.
2. Popov V. A., Papitashvili V. O., Watermann J. F., Modeling of equivalent ionospheric currents from meridian magnetometer chain data, *Earth Planets Space*, 2001, V. 33, P. 129-137.
3. Starkov G. V., Mathematical model of the auroral boundaries, *Geomagnetism and Aeronomy*, 34, 3, 80-86, 1994 (in Russian)

БЕСТРИГГЕРНЫЕ СУББУРИ И ФЛУКТУАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВНЕ И ВНУТРИ МАГНИТОСФЕРЫ

Ягова Н. В., Носикова Н. С.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, nyagova@yandex.ru

Целью работы является исследование волновых процессов во внешней магнитосфере и высокоширотных пульсаций на Земле за несколько часов до суббури без явного триггера в межпланетной среде (далее - бестриггерной). В работах [1, 2] было показано, что спектральные свойства пульсаций, наблюдаемых в полярных шапках и геомагнитном хвосте за несколько часов до суббури отличаются от свойств высокоширотных Pc5/Pi3, наблюдаемых в магнитоспокойные дни. В настоящей работе исследуются высокоширотные пульсации диапазона Pc5/Pi3 в период перед бестриггерной суббурей и связь этих пульсаций с флуктуациями магнитного поля, параметров плазмы и потоков частиц в космической плазме – от солнечного ветра до ионосферы. Используя методики, развитые в работе [1], гипотезы о свойствах предвестниковых УНЧ колебаний, сформулированные в [2], проверяются для авроральных и высокоширотных суббурь. Для определения наиболее вероятных источников и каналов распространения предсуббуревых Pc5/Pi3 анализируются пространственное распределение спектральной мощности, наклона и высших моментов спектрального распределения и спектральной когерентности пульсаций.

1. Yagova, N., Nosikova, N., Baddeley, L., Kozyreva, O., Lorentzen, D. A., Pilipenko, V., and Johnsen, M. G.: Non-triggered auroral substorms and long-period (1–4 mHz) geomagnetic and auroral luminosity pulsations in the polar cap, *Ann. Geophys.*, 35, 365-376, doi:10.5194/angeo-35-365-2017, 2017.
2. Nosikova N.S., Yagova N.V., Baddeley L., Lorentzen D., Pilipenko V.A. ULF pulsations preceding non-triggered isolated substorms, 14th International Conference on Substorms (ICS14), Tromsø, 30 сентября - 4 октября 2019.

ДИНАМИКА ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ В МИНИМУМЕ 24-ГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА

Е.А. Бондарев¹, В.С. Анашин¹, Г.А. Протопопов¹, В.И. Денисова², А.В. Цургаев², А.Ю. Репин²

¹Филиал АО «ОРКК» - «НИИ КП», г. Москва, Россия, info@orkkniikp.ru;

²Институт прикладной геофизики, г. Москва, Россия

В докладе представлены результаты анализа данных бортовых измерений потоков протонов с энергиями 15 МэВ, 25 МэВ и 600 МэВ, измеренных КА РФ на полярной орбите [1] в период 2017-2018 гг., а также 2009-2010 гг. Также представлены полетные данные о потоках протонов с энергиями: 13.7-23 МэВ, 23-42 МэВ, 42-112 МэВ по результатам измерений КА РФ на ГСО [1]. Кроме того, с целью улучшения качества анализа и расширения рассматриваемого энергетического диапазона протонов в данном докладе используются и данные КА GOES [2] и POES [3].

В докладе представлены результаты анализа динамики потоков протонов радиационного пояса Земли в минимуме 24-го солнечного цикла. Кроме того, рассмотрены вариации потоков протонов на различных широтах и значениях параметра Мак-Илвайна L.

1. V. S. Anashin, G. A. Protopopov, O. S. Kozyukova, P. V. Binyukov, and A. P. Polinkin, "Analysis of Space Environment Measurement Carried out by the Roscosmos Monitoring System Elements," 2014 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), Jul. 2014.
2. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/index.html> .
3. <https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/poes/data/processed/ngdc/corrected/peck> .
4. <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html> .

ИСТОРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ О МАГНИТНОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ ДЛЯ НАУКИ

Сергеева Н.А., Забаринская Л.П., Нисилевич М.В., Крылова Т.А.

ГЦ РАН, г. Москва, Россия, n.sergeyeva@gcras.ru

Мировой центр данных по солнечно-земной физике (МЦД по СЗФ) в Москве осуществляет сбор геофизических данных и управление данными, обеспечивая их долговременное хранение и распространение. В фондах Центра находится обширное собрание геомагнитных данных, полученных за 60 лет от российских и зарубежных геомагнитных обсерваторий и станций.

Сформирован электронный архив (репозиторий) для накопления, длительного хранения и обеспечения долговременного и открытого доступа к данным через веб-сайт МЦД по СЗФ <http://www.wdcb.ru/stp/index.ru.html>. Электронный архив включает цифровые изображения магнитограмм, минутные, среднечасовые и среднегодовые значения элементов геомагнитного поля, геомагнитные индексы, каталоги магнитных бурь и пульсаций магнитного поля.

В настоящее время исторические геофизические данные находят самое широкое применение в научных исследованиях. Наиболее ценными являются длинные ряды наблюдений. В МЦД по СЗФ активно развивается процесс преобразования находящихся на хранении исторических данных обсерваторий РФ и стран СНГ с бумажного носителя в электронный вид и последующей публикации на веб-сайте, что облегчает исследователям доступ к этим данным и их дальнейшую обработку.

Центр фокусируется не только на сборе текущих результатов геомагнитных наблюдений, но и на ретроспективном сборе данных. Коллектив Центра высоко ценит работу обсерваторий по подготовке исторических данных и передаче их на долгосрочное гарантированное хранение в МЦД по СЗФ. В последнее время в Центр были переданы большой массив цифровых изображений магнитограмм за период 1967-2006 гг. из обсерватории «Паратунка» и электронный набор среднечасовых значений элементов геомагнитного поля с 1887 г. по 1925 г. от обсерватории «Екатеринбург».

В МЦД по СЗФ создана реляционная база данных "Геомагнетизм", доступная в локальной сети и в сети Интернет, позволяющая эффективно хранить, извлекать информацию и управлять большими объемами данных, обеспечивая постоянный доступ к ним. Для работы с базой данных в сети пользователям предоставляется простой, удобный интерфейс. В настоящее время БД содержит 1-минутные значения элементов геомагнитного поля, среднечасовые значения элементов геомагнитного поля и уникальные многолетние ряды К-индекса с обсерваторий России и стран СНГ с 1957 года по настоящее время.

Написанное на PHP программное обеспечение использует сервер баз данных MySQL. Административный интерфейс и сайт пользователя были сделаны для пользовательского запроса и извлечения данных. В качестве параметров запроса можно рассматривать вид данных, комбинации трех часто используемых в геомагнетизме элементов (HDZ, XYZ), период наблюдения и название обсерватории, выбираемое из списка обсерваторий или с помощью картографического интерфейса. При этом пользователю предоставляется информация об обсерватории и наличии данных. В ответ на запрос пользователя на странице поисковой системы информация выдается в одном из трех возможных форматов: WDC, CSV или IAGA2002. Пользователь имеет возможность сохранить выбранный набор данных на своем компьютере.

Работа выполнена в рамках государственного задания Геофизического центра РАН, утвержденного Минобрнауки России. В работе использовались оборудование и материалы, предоставленные ЦКП "Аналитический центр геомагнитных данных" Геофизического центра РАН <http://ckp.gcras.ru/>.

Одновременные наблюдения высыпаний энергичных электронов в ходе аэростатных экспериментов и на ИСЗ «Метеор М2» в период 2015-2017 гг.

**Кугушева А. Д.¹, Власова Н.А.², Калегаев В.В.², Мягкова И.Н.², Петров К.А.¹,
Базилевская Г.А.³, Махмутов В.С.³**

*1 Физический факультет МГУ, 2 НИИЯФ МГУ, 3 ФИАН г. Москва, Россия,
kugusheva.ad@gmail.com*

Одним из проявлений динамики магнитосферы Земли являются высыпания в атмосферу энергичных электронов внешнего радиационного пояса. 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.

Высыпания энергичных электронов регистрируются непосредственно на полярных низковысотных ИСЗ серий POES и Метеор. Аэростатные эксперименты на высотах 20-30 км также позволяют обнаруживать вторжения энергичных электронов по рентгеновскому тормозному излучению. Одновременные наблюдения высыпаний энергичных электронов на разных высотах позволяют лучше понять физические механизмы этого явления, установить магнитосферные источники высыпаний и их связь с параметрами солнечного ветра и уровнем геомагнитной активности.

Используя базу данных, созданную сотрудниками ФИАН, по высыпаниям электронов внешнего радиационного пояса Земли, зарегистрированным в 2015-2017 гг. в ходе аэростатных экспериментов в Мурманской области ($L=5.5$), и данные измерений потоков электронов на ИСЗ «Метеор М2», был проведен анализ пространственно-временных характеристик и динамики высыпаний электронов с энергиями в диапазоне от 0.1 до 1 МэВ. 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.

**ОРБИТАЛЬНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ АВРОРАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА СОСТОЯНИЯ
ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ, КАК ЧАСТЬ СИСТЕМНОГО КОНТРОЛЯ
КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ**

Кузьмин А.К.¹⁾, Вайсберг О.Л.¹⁾, Мерзлый А.М.¹⁾, Петрукович А.А.¹⁾,
Крученицкий Г.М.²⁾, Баньщикова М.А.³⁾

1) ИКИ РАН, г. Москва, Россия, alkkuzmin@mail.ru, 2) ЦАО Росгидромет, г. Долгопрудный МО, Россия,
3) Томский государственный университет, Россия

В данной работе на конкретных представленных примерах рассматривается лишь малая часть характеристик, входящих в перспективную систему контроля космической погоды, относящихся к дистанционной оптической диагностике состояния полярной ионосферы. Примеры, иллюстрированные конкретными данными измерений авроральных эмиссий, полученными с различных орбит одновременно с характеристиками плазмы в окрестности космического аппарата (КА), рассматриваются в контексте использования экспериментального зарубежного и отечественного методического опыта, некоторых новых аспектов разработки и характеристик оптической изображающей аппаратуры в готовящихся проектах, а также перспектив их развития в ближайшем будущем.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ТРАЕКТОРИЮ НАКЛОННО-НАПРАВЛЕННОГО БУРЕНИЯ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Лукьянова Р.Ю.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, r.lukianova@gcras.ru

Современные технологии позволяют бурить скважины, которые практически горизонтально входят в нефтеносный слой. Наклонно направленное бурение требует четкого контроля ориентации буровой колонны под землей. Для измерения географического азимута часто применяют телеметрические измерительные системы, основанные на магнитометрической технологии. Эта технология является более экономичной в сравнении с применением гироскопов, так как магнитные инклинометры достаточно стабильны к механическим воздействиям и могут использоваться в качестве забойных навигационных систем. Стабильное следование расчетному направлению бурения и своевременная коррекция отклонений является важной задачей обеспечения заданных параметров скважины. Минимизация погрешностей, связанных с магнитным полем Земли, достигается путем применения современных моделей главного магнитного поля, моделей локальных магнитных аномалий и аэромагнитной съемки.

Однако в высоких широтах применять инклинометрию гораздо сложнее, чем в средне- и низкоширотных областях. В Арктике спорадические геомагнитные возмущения, связанные с магнитными бурями, вносят большую неопределенность в показания скважинных инклинометров при наклонно направленном бурении глубоких скважин. Вариации магнитного склонения, если они не отфильтровываются на основе данных параллельных обсерваторских наблюдений за уровнем геомагнитной активности, могут приводить к значительным отклонениям фактических координат ствола скважины от заданной траектории.

В данной работе с помощью методов, применяемых для расчета фактического профиля ствола скважины [1], проведены модельные оценки влияния спорадических возмущений магнитного склонения во время магнитной бури, на параметры скважины, включая такие критические характеристики как азимут смещения и интенсивность искривления ствола. Локации модельных скважин помещены в места расположения высокоширотных магнитных обсерваторий. Показано, что если геомагнитные возмущения не отфильтровываются, а включаются в показания скважинных инклинометров, это может приводить к неприемлемо большим погрешностям измерений и отклонению траектории ствола на величину, значительно превышающую допустимые значения.

1. Близнюков В.Ю. и др. Расчет и корректирование траектории скважины при бурении: метод, указания. УГТУ. 2014.

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ И В КАРЕЛИИ

**Маршалко Е.Е., Кругляков М.С., Кувшинов А.В., Соколова Е.Ю., Пилипенко В.А.,
Козырева О.В., Епишкин, Д.В., Сахаров, Я.А.**

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, elena.e.marshalko@gmail.com

Мы демонстрируем первые результаты трехмерного моделирования приповерхностных электрических полей для Кольского полуострова и Карелии. Моделирование выполняется с использованием программы *extrEMe* [Kruglyakov et al., 2016], основанной на методе интегральных уравнений. Анализ выполнен для серии геомагнитных ионосферно-магнитосферных событий, зарегистрированных сетью магнитометров IMAGE. Для вычисления геоиндуцированных электрических полей используется трехмерная модель проводимости земной коры Фенноскандии SMAP [Korja et al., 2002]. Исследуется связь геоэлектрических неоднородностей и характеристик расчетных электромагнитных откликов на внешнее плоскостное возбуждение. Результаты моделирования сравниваются с реальными временными рядами электрических полей, измеренными в ходе магнитотеллурических (МТ) зондирований Фенноскандии (проект BEAR, МТ исследования в Приладожье), а также с измерениями геоиндуцированных токов (ГИТ) в электросетях Кольского полуострова и Карелии.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 16-17-00121 "Развитие физических моделей для оценки риска негативного воздействия космической погоды на технологические системы").

Список литературы:

- Korja, T., et al. (2002). Crustal conductivity in Fennoscandia - a compilation of a database on crustal conductance in the Fennoscandian Shield. *Earth Planets Space*, 54, 535-558, doi:10.1186/BF03353044.
- Kruglyakov, M., Geraskin, A., and Kuvshinov, A. (2016). Novel accurate and scalable 3-D MT forward solver based on a contracting integral equation method. *Computers & Geosciences*, 96, 208-217, doi:10.1016/j.cageo.2016.08.017.

СБОИ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИКИ ОКТЯБРЬСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Сахаров Я.А.¹, Кудряшова Н.В.¹, Билин В.А.¹, Саранский С.Н.²

¹ Полярный геофизический институт, г. Мурманск; Россия, sakharov@pgia.ru

² Октябрьская железная дорога, г. Мурманск, Россия

В работе обсуждается связь между геомагнитными возмущениями и аномалиями в работе систем железнодорожной автоматики на Октябрьской железной дороге, идущей из Санкт-Петербурга в Мурманск, Россия. Реакция на сильные магнитные возмущения обнаруживается в виде сбоев в работе систем автоматики и нарушениях энергоснабжения на некоторых станциях в авроральной и субавроральной зонах. По нашим предположениям причиной эффектов является возбуждение ГИТ в системе энергоснабжения систем автоматики.

Выполнены статистические оценки связи между уровнем магнитных возмущений и аномалиями в работе систем автоматики за период 2002 - 2006 гг. При высоком уровне геомагнитной активности среднеширотная часть железной дороги более подвержена воздействию ГИТ.

Работа частично поддержана проектом KO2011 ARINKA II - Arctic Railway Infrastructure in Kolarctic, Программы Коларктик 2014-2020 г.

СУТОЧНЫЙ ХОД ПОТОКА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

Абунина¹ М.А., Абунин¹ А.А., Белов¹ А.В., Гайдаш¹ С.П., Крякунова^{2,3} О.Н., Николаевский² Н.Ф., Прямушкина¹ И.И. Шлык¹ Н.С.

¹ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, abunina@izmiran.ru

²Институт ионосферы, г. Алматы, Казахстан

³ФИАН, г. Москва, Россия

Одной из основных задач солнечно-земной физики является прогнозирование суточного флюенса электронов с энергиями более 2 МэВ на геостационарной орбите. На данный момент существует достаточно много научных работ, которые посвящены исследованиям в этой области. В одних работах описываются предполагаемые механизмы генерации этих частиц; в других – исследуются различия в поведении потока электронов во время межпланетных возмущений, вызванных различными типами солнечных источников; в третьих – предлагаются модели прогнозирования суточного флюенса этих частиц. Цель же данной работы заключается в том, чтобы исследовать суточный ход потока рассматриваемых частиц. Это позволит более точно прогнозировать поведение этих релятивистских частиц магнитосферного происхождения.

СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЙ ДЕТЕКТОР СОЛНЕЧНЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Стадничук Е.М., Зимовец И.В., Зелёный М.Е., Пальмин В.С., Моисеенко Д.А., Шестаков А.Ю., Журавлев Р.Н.

МФТИ, г. Долгопрудный, Россия, egrstadnichuk@yandex.ru

Для исследования спектра солнечных космических лучей на земной орбите [1] проектируется детектор. Детектор рассчитан на регистрацию протонов с энергией от 10 до 100 МэВ и электронов от 1 до 10 МэВ. Использование такого детектора также возможно для мониторинга солнечных вспышек с целью обезопасить космонавтов и космическую аппаратуру [3].

Детектор представляет собой цилиндр, состоящий из 20 сцинтилляционных шайб диаметром 3 см и толщиной 0.4 см (Рис. 1). Шайбы покрыты светоотражающим материалом – тайвеком. Сцинтилляционный свет выводится на SiPM Hamamatsu s12572-015p через оптоволокно Kuraray-Y11. SiPM в свою очередь крепятся к плате электроники (Рис. 2), которая считывает сигнал и подаёт его на АЦП CAEN DT 5742.

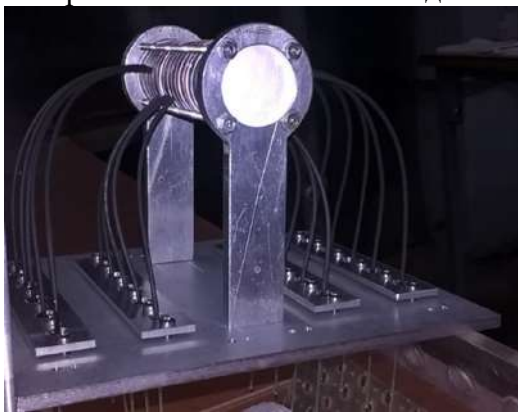


Рис. 1 Фотография физического макета детектора.

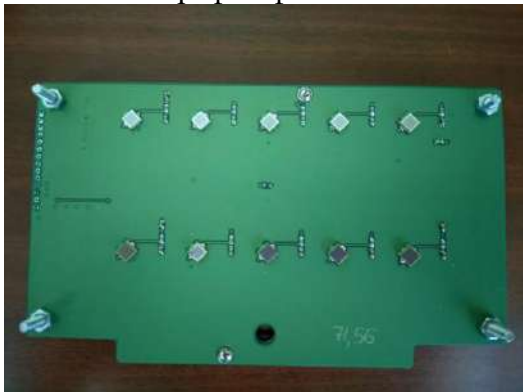


Рис. 2 Фотография SiPM на электронной плате.

1. Leonty Miroshnichenko. Solar Cosmic Rays: Fundamentals and Applications. Springer, 2015.
2. Claus Grupen and Boris Shwartz. Particle Detectors (Cambridge Monographs on Particle Physics, Nuclear Physics and Cosmology). Cambridge University Press, 2008.
3. Петрукович А.А., Дмитриев А.В., and Петров В.М. *Плазменная геофизика, Т. II*, chapter Космическая радиация. Физматлит, 2008.

ДИНАМИЧЕСКИЙ ГЕЛИОСФЕРНЫЙ ТОКОВЫЙ СЛОЙ И ЕГО РОЛЬ В ЛОКАЛЬНОМ УСКОРЕНИИ ЧАСТИЦ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Хабарова О.В.¹, Малова Х.В.^{2,3}, Кислов Р.А.^{1,2}, Мингалев О.В.⁴

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

² ИКИ РАН, г. Москва, Россия

³ НИИЯФ МГУ им. М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴ ПГИ, г. Апатиты, Россия

В течение длительного времени гелиосферный токовый слой (ГТС) считался структурой, разделяющей разнонаправленные линии межпланетного магнитного поля (ММП). Предполагалось, что ГТС скручен вдоль Паркеровской спирали наподобие «юбки балерины», медленно меняется и пассивно взаимодействует с быстрыми потоками солнечного ветра. Предполагалось, что космический аппарат пересекает его как плоский разрыв. Однако с течением времени стало ясно, что такой подход противоречит таким фактам, как

- наблюдение многочисленных токовых слоев и когерентных структур вокруг ГТС,
- необычное поведение энергичных электронов - стралов, характеризующихся провалами или двунаправленным видом функции распределения по углам вблизи ГТС,
- присутствие энергичных частиц вблизи ГТС и
- несоответствие между идентификацией ГТС через параметры ММП/плазмы и пич-углового распределения.

Открытие гелиосферного плазменного слоя (ГПС), окружающего ГТС, стало первым шагом к лучшему пониманию динамики ГТС. Следующим шагом было моделирование ГТС, которое выявило изгибные волны разного типа, а также складки и гофрирование поверхности HCS. Волнообразная и волнистая система ГТС/ГПС включает в себя токовые слои и мелкомасштабные магнитные острова (ММО), что значительно повышает эффективность стохастического магнитного пересоединения и позволяет ускорять захваченные энергичные частицы до энергий порядка МэВ. Принимая во внимание непланарность ГТС, наличие складок и ММО, можно решить проблему несоответствий в идентификации ГТС. В докладе обсуждаются ключевые наблюдательные аспекты динамики ГТС/ГПС и связанных с ними эффектов.

Работа коллектива поддержана грантом РФФИ 19-02-00957.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕАДИАБАТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ ИОНОВ В ПОЛЕ ТОКОВЫХ СЛОЕВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Виноградов А.А., Артемьев А.В., Васько И.Ю.

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

Измерения солнечного ветра на широком диапазоне расстояний от Солнца, выполненные приборами Helios, Ulysses, New Horizons, показывают, что радиальная эволюция температуры ионов солнечного ветра значительно отличается от модели адиабатического расширения (1). Решение проблемы нагрева солнечным ветром чрезвычайно важно как для понимания структуры гелиосферы, так и для адекватного описания атмосфер далеких звезд.

Магнитное поле солнечного ветра является турбулентным, и в нем преобладают многочисленные мелкомасштабные когерентные высокоамплитудные структуры, такие как токовые слои, которые были обнаружены в солнечном ветре первыми спутниковыми миссиями (2) как мелкомасштабные вращения или изменения амплитуды магнитного поля. Современные теоретические модели предполагают, что токовые слои могут внести существенный вклад в нагрев солнечного ветра, но нет единой общепринятой концепции механизма, ответственного за такой нагрев.

Динамика ионов в токовых слоях с сильным магнитным полем описывается в рамках квазиадиабатической теории (3). В нашей работе рассматривается динамика ионов в магнитном поле токового слоя, характерного для солнечного ветра, а именно: $B_x = B_0 \tanh(z/L)$, $B_y = \sigma_1 B_0 / \cosh(z/L) + \sigma_0 B_0$, $B_z = \text{const}$.

Обезразмеривая все переменные, можно видеть, что динамика ионов зависит от двух параметров $\eta = (\rho_0/L)^{1/2}$ и $\kappa = B_z/B_0(L/\rho_0)^{1/2}$, где $\rho_0 = (2Hm)^{1/2}c/eB_0$ - Ларморовский радиус, H - гамма-функция, которые определяют конфигурацию токового слоя. Если параметр $\kappa \ll 1$, то переменные разделяются на две пары: быструю и медленную координату и импульс. Периодичность быстрого движения частицы позволяет ввести квазиадиабатический инвариант как площадь, ограниченную замкнутой траекторией, нормированной на 2π . Принимая во внимание сохранение энергии, импульса и приближенное сохранение квазиадиабатического инварианта, можно проинтегрировать уравнения движения. Однако для достаточно тонких токовых слоев, ионы размагничиваются в центре слоя, и квазиадиабатический инвариант претерпевает скачок, что приводит к рассеянию иона.

Объединяя многоспутниковый анализ данных, теоретические модели и численное моделирование, в данной работе мы изучаем роль, которую играют токовые слои в рассеянии и термализации ионов солнечного ветра. Наши результаты будут затем применены для понимания новых измерений миссии NASA / Parker Solar Probe вблизи Солнца и будущих измерений ESA / Solar Orbiter.

1. Cranmer S.R. et al., Empirical constraints on proton and electron heating in the fast solar wind / W.H. Matthaeus, B.A. Breech, and J.C. Kasper // The Astrophysical Journal, 702:1604–1614, 2009
2. Colburn D. S. and Sonett C.P.: Discontinuities in the Solar Wind , Space Sci. Rev. 5, 439. (1966)
3. L.M. Zelenyi Quasiadiabatic dynamics of charged particles in a space plasma / A. I. Neishtadt, A.V. Artemyev, D.L. Vainchtein, H.V. Malova // Physics–Uspekhi 56 (4) 347-394 (2013)

ВЛОЖЕННЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ С МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ ПЛАЗМОЙ В МАГНИТОСФЕРАХ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Х.В. Малова^{1,2}, В.И. Домрин¹, В.Ю. Попов^{3,4,2}, Е.Е. Григоренко², А.А. Петрукович²

- 1 Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ, Москва, Ленинские Горы, hmalova@yandex.ru
- 2 Институт космических исследований РАН, Москва, Профсоюзная ул., 84/32.
- 3 Физический факультет МГУ, Москва, Ленинские горы.
- 4 Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва.,

Предложена самосогласованная гибридная модель тонкого токового слоя (ТС) толщиной порядка нескольких ионных гирорадиусов с учетом многокомпонентности бесстолкновительной космической плазмы. Несколько плазменных компонент могут присутствовать в хвостах магнитосфер планет земного типа (например, Земля, Меркурий, Марс, Венера). Проанализированы изменения структуры ТС в магнитосферной плазме в присутствии тяжелых ионов кислорода, обладающих разными характеристиками. Показано, что высокие относительные концентрации ионов кислорода, равно как их относительно высокие температуры и дрейфовые скорости приводят к существенному утолщению ТС и формированию дополнительного масштаба вложенности. При этом на профилях основных характеристик — плотности тока и магнитного поля появляются симметричные изломы, области резкой смены их градиентов. Проведено сравнение с данными наблюдений в магнитосфере Марса. Показано качественное согласие результатов моделирования с этими данными.

О ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ РАЗРЫВА ТОКОВОГО СЛОЯ С ПОМОЩЬЮ ИЗМЕРЕНИЙ ВНЕШНИМИ МАГНИТНЫМИ ЗОНДАМИ

***Франк А.Г., **Савинов С.А.**

**ИОФ РАН, г. Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru*

***ФИАН, г. Москва, Россия, s.a.savinov@mail.ru*

Изучение процессов магнитного пересоединения в лабораторных токовых слоях, включая импульсную фазу пересоединения, или разрыв слоя, обычно осуществляется с помощью магнитных зондов, размещенных внутри плазменного объема, в непосредственной близости от токового слоя или даже в пределах слоя. В связи с этим возникает вопрос, насколько введение в плазму твердотельных элементов (в том числе трубки с зондами) оказывает влияние на процессы в токовых слоях.

Имеющаяся к настоящему времени достаточно подробная информация о структуре токовых слоев, а также их пространственном положении, позволяет на основе измерений магнитных полей вне плазменного объема определять некоторые характеристики токовых слоев и, что особенно важно, дает, по-видимому, возможность детектировать разрыв слоя.

С целью выяснения перспектив такой диагностики типичные распределения линейной плотности тока вдоль поверхности слоя, полученные экспериментально, были аппроксимированы выбранными математическими функциями. Это позволило рассчитать сигналы магнитных зондов, расположенных в различных точках снаружи вакуумной камеры, в которой формируются токовые слои.

Показано, что на основе измерения магнитных полей вне плазменного объема может быть определена ширина слоя, или его больший поперечный размер, а также зависимость ширины слоя от времени и условий эксперимента.

В выбранных точках вне плазменного объема были рассчитаны изменения магнитных полей при возникновении разрыва в центральной области метастабильного токового слоя. Показано, что на основе соотношений между сигналами различных магнитных зондов возникает возможность регистрировать появление разрыва, оценить его ширину и проследить за эволюцией разрыва во времени.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № АААА-А19-1191211790086-9.

СИЛОВОЙ БАЛАНС В ТОКОВЫХ СЛОЯХ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ И В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

**О.В. Мингалев¹, И.В. Мингалев¹, Х.В. Малова^{2,3}, П.В. Сецко¹, М.Н. Мельник¹,
А. В. Артемьев³, О.В. Хабарова⁴, Л.М. Зелёный³**

¹ Полярный геофизический институт, Апатиты, mingalev_o@pgia.ru

² Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

³ Институт космических исследований РАН, Москва

⁴ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, Троицк, Россия

Для бесстолкновительной плазмы, состоящей из протонов и замагниченных электронов получена новая форма уравнения силового баланса протонов, в которой электрическое поле выражено через магнитное поле и дивергенцию тензора давления электронов. Последнее уравнение необходимо для правильной постановки граничных условий в моделях токовых слоев и для контроля силового баланса в этих моделях. Из этих уравнений впервые получена общая форма уравнения силового баланса в пространственно одномерном токовом слое с учетом анизотропии давления электронов. Также приведены результаты применения полученного уравнения в численных моделях стационарных тонких токовых слоев.

Уравнение потока импульса для протонов может быть представлено в форме:

$$\frac{\partial \mathbf{j}_p}{\partial t} = \frac{e}{m_p} \left(e n_p \mathbf{E} - [\mathbf{B} \times \mathbf{j}_p] - \text{div} \hat{\mathbf{P}}_p \right), \quad \text{где}$$

$$n_p(\mathbf{x}, t) = \int_{\mathbb{R}^3} f_p(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d^3 \mathbf{v}, \quad \mathbf{j}_p(\mathbf{x}, t) = e \int_{\mathbb{R}^3} \mathbf{v} f_p(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d^3 \mathbf{v}, \quad \hat{\mathbf{P}}_p(\mathbf{x}, t) = m_p \int_{\mathbb{R}^3} \mathbf{v} \otimes \mathbf{v} f_p(t, \mathbf{x}, \mathbf{v}) d^3 \mathbf{v},$$

и через $(\mathbf{u} \cdot \mathbf{v})$ и $[\mathbf{u} \times \mathbf{v}]$ обозначены соответственно скалярное и векторное произведение векторов $\mathbf{u}$ и $\mathbf{v}$ в пространстве $\mathbb{R}^3$, а через $\mathbf{u} \otimes \mathbf{v}$ обозначен образованный этими векторами диадный тензор с декартовыми компонентами $(\mathbf{u} \otimes \mathbf{v})_{k,l} = u_k v_l$.

Условие полного силового равновесия замагниченных электронов имеет вид

$$e n \mathbf{E} = -[\mathbf{B} \times \mathbf{j}_e] - \text{div} \hat{\mathbf{P}}_e,$$

и позволяет выразить электрическое поле $\mathbf{E}$ через магнитное поле $\mathbf{B}$ и концентрацию $n = n_e = n_p$, плотность тока $\mathbf{j}_e$ и дивергенцию тензора давления электронов $\hat{\mathbf{P}}_e$, которая в случае замагниченных электронов определяются формулами (где $\hat{\mathbf{I}}$ — единичный тензор):

$$\hat{\mathbf{P}}_e = p_{e\perp} \hat{\mathbf{I}} + (p_{e\parallel} - p_{e\perp}) \mathbf{b} \otimes \mathbf{b}, \quad \mathbf{b} = \mathbf{B}/B, \quad B = |\mathbf{B}|,$$

$$\text{div} \hat{\mathbf{P}}_e = \nabla p_{e\perp} + \mathbf{b} (\mathbf{b} \cdot \nabla (p_{e\parallel} - p_{e\perp})) + (p_{e\parallel} - p_{e\perp}) ((\mathbf{b} \cdot \nabla) \mathbf{b} - \mathbf{b} (\mathbf{b} \cdot \nabla \ln B)),$$

где $p_{e\parallel}$ и $p_{e\perp}$ — продольное и поперечное давления электронов. В результате уравнение силового баланса для протонов может быть представлено в следующих формах:

$$\frac{\partial \mathbf{j}_p}{\partial t} = -\frac{e}{m_p} \left(-\frac{(\mathbf{B} \cdot \nabla) \mathbf{B}}{\mu_0} + \nabla \left(\frac{B^2}{2\mu_0} \right) + \text{div} (\hat{\mathbf{P}}_p + \hat{\mathbf{P}}_e) \right) = -\frac{e}{m_p} \text{div} \left(-\frac{\mathbf{B} \otimes \mathbf{B}}{\mu_0} + \frac{B^2}{2\mu_0} \hat{\mathbf{I}} + \hat{\mathbf{P}}_p + \hat{\mathbf{P}}_e \right).$$

В случае стационарного пространственно 1-мерного токового слоя, в котором координата z направлена поперек слоя и через $\mathbf{e}_x$, $\mathbf{e}_y$ и $\mathbf{e}_z$ обозначены векторы декартова базиса системы координат, это уравнение принимает векторную форму

$$\Pi_{x,z} \mathbf{e}_x + \Pi_{y,z} \mathbf{e}_y + \left(\Pi_{z,z} + \frac{B^2}{2\mu_0} + p_{e\perp} \right) \mathbf{e}_z + \frac{B_z \mathbf{B}}{\mu_0} \left(\frac{\mu_0}{B^2} (p_{e\parallel} - p_{e\perp}) - 1 \right) \equiv \text{Const},$$

и имеет важное значение для моделей стационарных токовых слоев.

ПРИМЕНЕНИЕ МГД-МОДЕЛИ ТОКОВОГО СЛОЯ, ОТДЕЛЯЮЩЕГО ПОТОК ПЛАЗМЫ ОТ ОБЛАСТИ СИЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ, К ОПИСАНИЮ МАГНИТОПАУЗЫ ЗЕМЛИ

Юшков Е.В., Артемьев А.В., Петрукович А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yushkov.msu@mail.ru

Магнитопауза Земли разделяет поток холодной плазмы солнечного ветра и область разреженной плазмы с сильным магнитным полем. Для описания такой структуры в рамках идеального мгд-подхода была предложена модель токового слоя в несжимаемом приближении. Путем обобщения результатов работы [1], в которой мгд-система сводилась к хорошо изученному уравнению Град-Шафранова (см., например, [2]), нам удалось описать одномерные, двумерные и квази-трехмерные структуры, разделяющие потоки плазмы с различными характеристиками. Используя идеи D.Nickelera и вводя модифицированный векторный потенциал и давление, предложенная модель позволяет восстановить профили магнитного поля и плотности тока на основе модельной взаимосвязи $P(A)$ в уравнении ГШ. Обобщения на многомерные случаи и случаи плазменных потоков, движущихся не параллельно к магнитному полю, удастся развить путем введения в рассмотрение недиагональных компонент тензора плазменного давления. Слоистая структура моделируемых токовых слоев при этом определяется функцией альвеновского числа Маха, связывающего скорость плазмы и магнитное поле. Так как применимость модель может быть изучена только при сравнении с экспериментальными данными, то в настоящей работе проводится анализ и подбор параметров модели для описания реальной земной магнитопаузы. Отдельное внимание уделяется вопросам устойчивости модели в предложенном подходе и возможностям проверки квазистационарности модели через спутниковые измерения тензора давления при пересечении границы магнитосферы аппаратами миссии MMS.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-02-00218.

1. Nickeler, D., Wiegmann, T. // *Annales Geophysicae*, 28, p. 1523, 2010.
2. Shafranov, V.D.. // *Reviews of Plasma Physics*, Vol. 2, New York: Consultants Bureau, 1966.

ОДНОМЕРНАЯ МОДЕЛЬ МАГНИТОПАУЗЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ФУНКЦИЯМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ

Кочаровский Вл.В.¹, Кочаровский В.В.^{1,2}, Мартьянов В.Ю.³, Нечаев А.А.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 Intel Corp., Chandler, USA

С целью описания магнитопауз, отделяющих магнитосферы планет от звездного ветра или звездный ветер с магнитным полем от окружающей межзвездной среды, найдено точное решение уравнений Максвелла – Власова для широкого класса стационарных токовых слоев, определяющих структуру магнитного поля и согласованные неоднородные анизотропные распределения частиц по импульсам с различными эффективными температурами [1]. Найденные решения впервые дают возможность рассматривать тонкую структуру магнитопаузы, недоступную магнитогидродинамическому описанию.

Показано, что качественные свойства таких слоев, описываемых функцией распределения в виде произвольной изотропной функции энергии частицы, умноженной на ступенчатую функцию Хевисайда от обобщенного импульса, не зависят от конкретного вида изотропного множителя. В частности, получены аналитические выражения для плотности тока и концентрации анизотропной плазмы в слое для случаев максвелловского и каппа-распределений по энергиям.

Построенные слои допускают многократное немонотонное изменение магнитного поля и могут иметь асимметричные, многогорбые и знакопеременные профили плотности тока. Токи различных фракций частиц могут обладать разными масштабами и быть сдвинуты друг относительно друга в пространстве, а общая толщина магнитопаузы определяется типичным ионным гирорадиусом фракции с наибольшим энергосодержанием. Рассмотренные различные модели могут быть использованы для интерпретации имеющихся наблюдений токовых структур в магнитопаузе Земли.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ, проект № 16-12-10528. Работа Нечаева А.А. поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС», проект № 18-1-5-53-1.

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.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ИОНОВ В АРГОНОВОЙ ПЛАЗМЕ ЛАБОРАТОРНЫХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ

Кирий Н.П.

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, natalya.kyrie@yandex.ru

В работе исследовались процессы нагрева ионов аргона разной степени ионизации в токовых слоях, сформированных в 2D и 3D магнитных конфигурациях. Исследования проводились на установке «Токовый слой» - ТС-3D спектральными методами с помощью монохроматора МДР-3 и программируемой цифровой электронно-оптической камеры «Nanogate 1-UF». Токовые слои формировались при разряде в аргоне, начальное давление газа составляло 30 мТорр; амплитуда тока в плазме - $I_z^{\max} = 45$ кА; градиент поперечного магнитного поля - $h = 0.5$ кГс/см; продольная компонента магнитного поля либо отсутствовала (2D магнитная конфигурация), либо равнялась $B_z = 2.9$ кГс (3D магнитная конфигурация) [1].

Регистрировались и анализировались профили спектральных линий ионов аргона: $Ar II$ 480.6, $Ar III$ 379.5 и $Ar IV$ 280.9 нм, которые уширялись за счет эффекта Доплера. Излучение плазмы собиралось из центральной квазицилиндрической области, вытянутой вдоль направления тока. Пространственное разрешение спектральных измерений составляло 1.5 см, временное – 0.8 мкс.

Зарегистрирована необычная ионизационная кинетика аргона в токовом слое, которая свидетельствует о сильной неоднородности плазмы в пределах пространственной области, из которой принималось излучение.

Установлено, что однозарядные ионы аргона $Ar II$ нагреваются до температуры $T_i^{\max} \approx 60$ эВ. Несколько позже максимальной температуры, $T_i^{\max} \approx 120$ эВ, достигают двухзарядные ионы аргона $Ar III$. Максимальная температура трехзарядных ионов аргона $Ar IV$ составляет $T_i^{\max} \approx 200$ эВ. Показано, что температуры ионов аргона $Ar II$, $Ar III$ и $Ar IV$ не зависят от величины продольного магнитного поля B_z [2].

Сделаны оценки характерных времен релаксации энергии и длин свободного пробега ионов аргона разной температуры и заряда, из которых следует, что ионы аргона $Ar II$, $Ar III$ и $Ar IV$ локализованы в различных пространственных областях токового слоя, отстоящих на разных расстояниях от средней плоскости слоя, и поэтому их температуры не выравниваются в процессе эволюции токового слоя.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что температура ионов аргона в плазме токового слоя пропорциональна заряду иона; температура ионов существенно изменяется в направлении, перпендикулярном средней плоскости слоя, максимум температуры составляет $T_i^{\max} \approx 200$ эВ.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № АААА-А19-119121790086-9.

1. А.Г. Франк, В.П. Гавриленко, Н.П. Кирий, Г.В. Островская / Оптика низкотемпературной плазмы, под ред. В.Н. Очкина. Сер. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. М.: Янус, 2008. С. 335.
2. Кирий Н.П., Франк А.Г., Васильков Д.Г. // Физика плазмы 2019. Т. 45. С. 313.

**Мембранные моды на магнитопаузе и их нелинейные связи с
внутримагнитосферными и ионосферными модами.**

Савин С. П.¹, Ляхов В. В.², Нещадим В. М.², Скальский А. А.¹

(1) ИКИ РАН, г. Москва, Россия, RF,

(2) DTO "Institute of Ionosphere", Almaty, K(3) National Space Science Center, Chinese

Нами подтверждено наличие сжимаемых волн мембранного типа у магнитопаузы по данным ИНТЕРБОЛ-1, СПЕКТР-Р, THEMIS, CLUSTER, GEOTAIL в диапазоне 0.015 – 20 мГц. Мы предложили новую мембранную модель магнитопаузы, которая впервые объясняет генерацию волн на 0.015 – 0.05 мГц (качественно), а также разные частоты в разных точках магнитослоя и магнитосферы. Прошлые модели использовали несжимаемые волны. При сравнении нашей модели с данными, в том числе опубликованными и новыми, мы открыли существенно нелинейный способ синхронизации резонансов в разных областях магнитосферы. Это происходит за счет генерации нелинейных гармоник и 3й х- волновых каскадов. Причем, внешние волны на 0.015 – 0.05 мГц (сжимаемые) путем нелинейных каскадов возбуждают резонансы силовых линии на частотах выше 3 мГц (Альвеновские), которые легко достигают полярной ионосферы.

ЭСТАФЕТНЫЙ МЕХАНИЗМ НАСЫЩЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБОВ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Кочаровский Вл.В.¹, Бородачёв Л.В.², Коломиец Д.О.², Кочаровский В.В.^{1,3}, Нечаев А.А.¹

¹ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

³Dept. of Physics and Astronomy, Texas A&M Univ., College Station, USA

Путём детального численного моделирования методом частиц в ячейках установлены закономерности согласованной, запаздывающей эволюции различных пространственных гармоник квазимагнитостатической турбулентности и временные зависимости амплитуд этих гармоник на качественно разных стадиях долговременного нелинейного развития вейбелевской неустойчивости в исходно двухтемпературной бесстолкновительной плазме. Дана оценка эффектов нелинейного взаимодействия гармоник как на стадии их насыщения, так и на стадиях экспоненциального и степенного роста и затухания. Найдены качественно разные стадии эволюции определённых характеристик движения (квазисвободная бунчировка, баунс-осцилляции, магнитный захват, слабое или сильное рассеяние и др.) для различных фракций частиц в ходе указанной вейбелевской неустойчивости. Указаны фракции частиц, для которых баунс-осцилляции или эффективное рассеяние может быть обусловлено теми или иными участками спектра турбулентности с учётом её нестационарного характера. Рассмотрено согласование запаздывающей эволюции различных пространственных гармоник магнитного поля и тока со сменой выявленных стадий эволюции соответствующих фракций частиц, которые поддерживают своими токами данные гармоники, но, постепенно захватываясь магнитным полем и высвобождаясь из него, со временем начинают участвовать в распаде или росте других гармоник.

Устанавливаемая связь многостадийной динамики пространственных гармоник квазимагнитостатической турбулентности и соответствующего изменения характера движения поддерживающих их фракций частиц впервые позволяет дать замкнутое, детализированное объяснение общего, автомодельного закона эволюции пространственного спектра данной турбулентности на значительном, основном этапе нелинейного развития вейбелевской неустойчивости исходного бимаксвелловского распределения частиц. Выявлены конкретные закономерности временного хода различных пространственных гармоник турбулентности и особенности динамики соответствующих фракций частиц на качественно разных стадиях, обеспечивающие согласование этого хода с найденными показателями степенного спектра турбулентности и позволяющие выделить те или иные явления, происходящие на её фоне.

Полученные результаты использованы для анализа и интерпретации ряда явлений в анизотропной плазме солнечного ветра, обусловленных медленно эволюционирующей квазимагнитостатической турбулентностью, вызванной длительным развитием вейбелевской неустойчивости.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-29-21029.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ ГЕНЕРАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАСШИРЯЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЕ С ГОРЯЧИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

Нечаев А.А., Гарасёв М.А., Кочаровский Вл.В., Степанов А.Н.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, ant.a.nech@gmail.com

Исследована генерация и эволюция магнитного поля в результате развития вейбелевской неустойчивости под фронтом электростатической ударной волны при распаде сильного разрыва между плотной плазмой с горячими электронами и разреженной холодной плазмой [1]. С помощью численного моделирования методом частиц в ячейках установлено, что генерация сильного магнитного поля происходит тогда, когда характерный размер области плазмы с достаточно большой степенью анизотропии распределения электронов по скоростям, возникающей вследствие расширения горячей плазмы, превышает оптимальный масштаб филаментов токов вейбелевской неустойчивости. Генерируемые токи направлены в основном вдоль фронта формирующейся ударной волны, а волновые вектора пространственного спектра плотности тока ориентированы преимущественно по нормали к фронту.

Показано, что энергия генерируемого магнитного поля в области генерации может составлять несколько процентов от начальной энергии горячих электронов там. Подобное магнитное поле может оказывать влияние на перераспределение энергий электронов и ионов и на перемешивание фазовых траекторий частиц под фронтом ударной волны. В частности, показано, что холодные электроны фоновой плазмы и часть горячих электронов замагничиваются созданным магнитным полем и стратифицируются в пространстве. Изучены особенности структуры генерируемого магнитного поля с использованием двумерных и одномерных расчетов при различных параметрах горячей и фоновой плазмы.

Обсуждается возможность реализации рассмотренного сценария генерации магнитного поля при расширении космической плазмы с горячими электронами в фоновую холодную плазму.

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-29-21029. Работа Нечаева А.А. выполнена при поддержке РФФИ № 18-32-01065.

1. Нечаев А. А., Гарасёв М. А., Степанов А. Н., Кочаровский В. В. Формирование слоя уплотнения в бесстолкновительной электростатической ударной волне при расширении горячей плотной плазмы в холодную и разреженную // Физика плазмы. 2019. Направлена.

МЕЛКОМАСШТАБНЫЙ АНАЛИЗ КЛАССИЧЕСКОГО АЛЬФА-КВЕНЧИНГА В ДИНАМО-МОДЕЛИ ШТЕЕНБЕКА-КРАУЗЕ-РЭДЛЕРА

Юшков Е.В., Лукин А.С., Соколов Д.Д.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yushkov.msu@mail.ru

В работе представлено сравнение хорошо известной модели среднего поля, предложенной Штеенбеком, Краузе и Рэдлером в 1980 г. для описания генерации крупномасштабных полей [1], и модели Казанцева, описывающей работу мелкомасштабного динамо в неограниченном однородном и изотропном пространстве [2]. Для мелкомасштабного подхода рассматривается субкритический режим низких чисел Рейнольдса, при котором отсутствует быстрая генерация. Этот же режим можно понимать и как процесс, в котором мелкомасштабная генерация остановлена за счет своих внутренних механизмов, что, однако, не мешает в зеркально-асимметричной среде работать крупномасштабной генерации (см., например, [3]). В рамках разномасштабных подходов двух классических моделей исследуется, чем различаются спектры линейного и нелинейного процесса при подавлении кинетической спиральности, другими словами, проводится анализ классического альфа-квенчинга. В работе проверяется, ведет ли усреднение уравнения индукции по масштабам большим, чем корреляционная длина поля скорости (модель ШКР), к потере каких-либо черт спектра вблизи малых диссипативных масштабов (модель Казанцева). Изучаются различные неклассические варианты квенчинга, использование которых кажется более обоснованным с физической точки зрения, чем стандартное альфа-подавление, но более трудоемким в рамках крупномасштабных моделей, содержащих ограниченную информацию о случайном поле скорости. В частности, рассматривается интегральный квенчинг, при котором сохраняется полная энергия, и спектральный квенчинг, который предполагает сохранение энергии/спиральности в каждой спектральной оболочке, не предполагая их перераспределение по спектру. Предложен вариант нелинейного подавления, основанный на идее баланса полной спиральности (как меры асимметрии), и показана возникающая при этом смена знака кинетической спиральности на больших масштабах.

Работа выполнена при поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, №18-02-00085 (численный эксперимент) и фондом БАЗИС №18-1-1-77-3 (анализ полученных результатов).

1. Krause F., Radler K.-H. // Oxford, Pergamon Press, Ltd., 271 p., 1980.
2. Казанцев А.П. // ЖЭТФ, 53, 1806-1813, 1967.
3. Vainshtein S., Kichatinov L. // Journal of Fluid Mechanics, 168, 73-87, 1986.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗВИТИЯ СТУПЕНЧАТОГО ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ЛИДЕРА МОЛНИИ

Сысоев А.А., Иудин Д.И., Булатов А.А., Раков В.А.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, zaratustrann@yandex.ru

Уже около сотни лет назад было замечено, что отрицательный лидер в воздухе, в отличие от положительного, всегда развивается ступенчатым образом, прирастая за счет слияния с так называемыми пространственными лидерами [1]. Причины данной асимметрии и сама физика процесса появления новой ступени отрицательного лидера до сих пор не ясны.

Данное исследование развивает идеи недавно опубликованной работы [2], в которой была представлена усовершенствованная 3-D модель развития молнии. Построенная модель была применена к изучению вопроса о возникновении различных типов молниевых разрядов в зависимости от структуры заряда облака. К ключевым особенностям модели [2] можно отнести динамическое вероятностное ветвление, двунаправленное распространение, возможность одновременного роста и / или распада нескольких периферийных веток, временную эволюцию проводимости, продольного электрического поля и тока разрядных каналов, а также наличие вероятностного порогового поля роста разрядных каналов.

Модификация модели [2], представленная в настоящей работе, впервые, насколько известно авторам, учитывает асимметрию пороговых полей развития положительных и отрицательных стримеров, что делает возможным воспроизведение ступенчатого развития отрицательного лидера. Модель имеет беспрецедентно малое 3-х метровое пространственное разрешение, что позволяет моделировать тонкую структуру стримерной короны отрицательного лидера и адекватно описывать сопровождающий образование ступени процесс стримерно-лидерного перехода.

В данной работе проведено моделирование полного цикла развития ступенчатого отрицательного лидера, включающего возникновение пространственных стемов, трансформацию некоторых из них в биполярные пространственные лидеры и контакты положительных частей пространственных лидеров с каналом основного отрицательного. Каждый такой контакт приводит к скачкообразному перемещению головки отрицательного лидера на длину образовавшейся ступени (пространственного лидера) и мощной вспышке стримерной короны с новой головки отрицательного лидера.

Сравнение результатов моделирования с последними данными высокоскоростной съемки процесса ступенчатого развития отрицательного и стреловидного лидеров молнии (см., например, [3] и ссылки там) позволяет говорить о высокой степени сходства не только морфологии, но и основных электрических параметров модельного и реального разрядов.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №19-17-00183 «Исследование процессов инициации и развития молниевых разрядов в атмосфере Земли».

1. Schonland B. F. J. // Handbuch der Physik 1956. V. **22**. P. 576.

2. 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**. P. 6416.

3. Qi Q., W. Lua, and Y. Ma, L. Chen, Y. Zhang, and V. A. Rakov // Atmos. Res. 2016. V. **178-179**. P. 260.

РОЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ИНИЦИАЦИИ МОЛНИЙ В ПЛАНЕТАРНЫХ АТМОСФЕРАХ

Иудин Д.И.

ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, iudin@ipfran.ru

Общеизвестно, что наблюдаемые в грозовых облаках электрические поля имеют пиковые значения на порядок меньше, чем уровень пробоя воздуха на этих высотах. Этот факт делает вопрос о физических механизмах инициации и развития молниевых разрядов одной из самых интригующих проблем атмосферного электричества. Поиск адекватного описания инициации и развития молнии становится сегодня особенно актуальным как в связи с тенденцией к усилению грозовой активности на планете, так и в связи с повсеместным использованием в навигационных системах и системах жизнеобеспечения крупных промышленных агломераций элементов слаботочной электроники, уязвимых для мощного электромагнитного воздействия молниевых ударов. В работе рассматривается новый сценарий инициации молнии как последовательности переходов разрядной активности с малых пространственных масштабов на более протяжённые масштабы [1]. Первая стадия сценария представляет собой переход от мелкомасштабных таунсендовских лавин к мезомасштабным стримерам; вторая стадия – переход от стримерных разрядов к крупномасштабной системе горячих лидерных каналов. Первый этап зарождения и развития молниевых разрядов рассматриваются как индуцированный квазиэлектростатическим шумом неравновесный фазовый переход [2]. Источником шума является коллективное электрическое поле взвешенных в турбулентном потоке заряженных частиц. За последние 30 лет стало очевидно, что даже небольшой шум может вызвать качественные изменения в системе, находящейся вдали от теплового равновесия. Наличие шума может не просто уменьшать, а, наоборот, существенно увеличивать чувствительность систем к слабым внешним воздействиям и приводить к появлению динамических режимов, реализация которых при отсутствии шума невозможна. В грозовых и аэрозольных системах планетарных атмосфер, где взаимодействующие компоненты имеют контрастные свойства (существенно различающиеся подвижности, коэффициенты диффузии, времена жизни), добавление шума приводит к эффекту подпорогового размножения с перераспределением «ресурса» компонент (депонированием) и сопровождается существенным понижением порога генерации сложных (чаще всего, фрактальных) диссипативных структур по сравнению с системами без шума. Одним из основных моментов предлагаемого сценария является то, что генерация стримеров в основном определяется уровнем мелкомасштабных и мезомасштабных флуктуаций электрического поля в грозовом облаке и практически не зависит от величины крупномасштабного поля. В свою очередь, роль крупномасштабного электрического поля заключается в обеспечении взаимодействия возникающих стримеров, когда последние начинают развиваться преимущественно в направлении внешнего поля на втором этапе предложенного сценария.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским Научным Фондом, соглашение 19-17-00183.

1. Iudin, D.I., Rakov, V.A., Syssoev, A.A. et al. Formation of decimeter-scale, long-lived elevated ionic conductivity regions in thunderclouds. *npj Clim Atmos Sci* 2, 46 (2019) doi:10.1038/s41612-019-0102-8.
2. Iudin, D.I. Lightning-Discharge Initiation as a Noise-Induced Kinetic Transition, *Radiophys Quantum El* (2017), Vol. 60, No. 5, , pp. 374 – 394, doi.org/10.1007/s11141-017-9807-x.

ФОРМИРОВАНИЕ ПЫЛЕВОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ХОНДРИТОВУЮ МИШЕНЬ

**Бурдонский И.Н.^{1, 2}, Леонов А.Г.¹, Юфа В.Н.^{1, 2}, Голубь А.П.³, Попель С.И.³,
Садовский А.М.³**

¹МФТИ, г. Долгопрудный Московской области, Россия, uifa_v@mail.ru

²ГНЦ РФ Тринити, г. Троицк, г. Москва, Россия

³ИКИ РАН, г. Москва, Россия, asadovsk@iki.rssi.ru

На установке «Сатурн» [1] исследовано взаимодействие лазерного излучения интенсивностью до 10^{12} Вт/см² и длительностью импульса 30 нс с пористой хондритовой мишенью, на поверхности которой содержатся мелкодисперсные частицы талька. Показано, что данное взаимодействие моделирует ряд характерных черт ударного взаимодействия метеороида с космическим телом, в результате которого образуется сильная ударная волна, распространяющаяся (и ослабевающая при движении) от эпицентра метеороидного взрыва. В конечном итоге, ослабевшая ударная волна трансформируется в линейную звуковую волну. При ударе метеороида формируются зоны, характеризующие происходящие при этом процессы: зона испарения вещества (I), зона плавления вещества (II), зона разрушения частиц, находящихся на поверхности мишени, и их необратимых деформаций (III), а также зона нелинейных упругих деформаций этих частиц (IV), характеризующаяся значениями давления в нелинейной звуковой волне, меньшими динамического предела упругости. За зоной IV находится зона линейных упругих деформаций (V), в которой звуковая волна может рассматриваться как линейная. Известно [2-4], что ударное взаимодействие метеороидов с космическим телом приводит к формированию плазменно-пылевой системы над его поверхностью. Лазерное моделирование может использоваться для исследования подъема мелкодисперсных частиц из зон III-V, их зарядки и процессов формирования плазменно-пылевой системы у поверхности мишени. В настоящей постановке эксперименты проводились в недостаточном вакууме. В этой связи в порах мишени, по-видимому, развивались процессы кумуляции, что приводило к повышенным значениям скорости (~ 5 км/с) мелкодисперсных частиц талька, отделившихся от мишени. Такого рода процессы могут происходить у поверхностей планет, имеющих атмосферы. Обсуждается возможность применения полученных результатов для описания подъема пылевых частиц над поверхностью Марса. Разрабатываются методы оценки зарядов пылевых частиц, отделяющихся от мишени, в экспериментах. Обсуждается возможность модификации экспериментальной установки с целью моделирования плазменно-пылевых процессов, происходящих у Луны.

Работа выполнена при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 18-02-00341.

1. Бурдонский И.Н., Гольцов А.Ю., Леонов А.Г., Макаров К.Н., Тимофеев И.С., Юфа В.Н. // Вопросы атомной науки и техники. Серия термоядерный синтез, том 36, выпуск 2, с. 8-18, 2013.
2. Попель С.И., Голубь А.П., Лисин Е.А., Извекова Ю.Н., Атаманюк Б., Дольников Г.Г. Захаров А.В., Зеленый Л.М. // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. 103, № 9. С. 641.
3. Попель С.И., Голубь А.П., Зеленый Л.М., Хораньи М. // Письма в ЖЭТФ. 2017. Т. 105, № 10. С. 594.
4. Попель С.И., Голубь А.П., Захаров А.В., Зеленый Л.М., Бережной А.А., Зубко Е.С., Итен М., Лена Р., Спозетти С., Великодский Ю.И., Атаманюк Б. // Письма в ЖЭТФ. 2018. Т. 108, № 6. С. 379.