
Российская Академия Наук
СЕМНАДЦАТАЯ ЕЖЕГОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
7-11 февраля 2022
ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ
ИКИ
ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН
РОССИЯ
МОСКВА
Профсоюзная, 84/32

Содержание

Расписание секций по дням…… 1

Теория и наблюдения Солнца…… 2

Солнечный ветер и гелиосфера…… 87

Магнитосфера…… 120

Ионосфера…… 160

Воздействие космических факторов на атмосферу и климат Земли…… 200

Прогноз космической погоды и прикладные вопросы физики магнитосферы и ионосферы…… 218

Волновые явления в космической плазме…… 257

Теория космической плазмы …… 294

Теория и наблюдения токовых слоев…… 299

Турбулентность и хаос…… 312

Распределение секций конференции ФИЗИКА ПЛАЗМЫ В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ - 2022

День недели/время		Конференц-Зал (Zoom 1)	Комната 200 (Zoom 2)	Комната 202 (Zoom 3)
07.02.2022	Утро (09:30-12:00)	Теория и наблюдения Солнца		Ионосфера
	Пленарный час (12:00-13:15)	**Открытие конференции**		
		Пленарные доклады секций «Ионосфера» и «Солнце»		
	Вечер (14:00-17:30)	Теория и наблюдения Солнца		Ионосфера
	(17:30-18:00)	Постерная сессия		Постерная сессия
08.02.2022	утро(09:30-12:00)	Теория и наблюдения Солнца	09:30-15:15 Турбулентность и хаос	Магнитосфера
	Пленарный час (12:00-13:00)	Пленарные доклады секции «Солнце»		
	Вечер(14:00-17:30)	Теория и наблюдения Солнца	15:15-16:30 Теория космической плазмы	Магнитосфера
	(17:30-18:00)	Постерная сессия	16:30-17:00 Постерная сессия	Постерная сессия
09.02.2022	Утро (09:30-12:00)	Солнечный ветер и гелиосфера	Ионосфера	Теория и наблюдения Солнца
	Пленарный час (12:00-13:00)	Пленарные доклады секций «Солнечный ветер и гелиосфера» и «Атмосфера»		
	Вечер (14:00-16:30)	Солнечный ветер и гелиосфера	Атмосфера	Теория и наблюдения Солнца
	(16:30-17:00)	Постерная сессия	Постерная сессия	Постерная сессия
10.02.2022	Утро (09:30-12:00)	Космическая погода	Токовые слои	Волновые явления
	Пленарный час (12:00-13:00)	Пленарные доклады секций «Космическая погода» и «Турбулентность и хаос»		
	Вечер (14:00-17:30)	Космическая погода		Волновые явления
	(17:30-18:00)	Постерная сессия	Постерная сессия / Постерная сессия	Постерная сессия
11.02.2022	Утро (09:30-12:00)	Пленарный доклад секции «Волновые явления»		
	День (12:00-15:00)	Волновые явления / Волновые явления		Космическая погода / Космическая погода
	(15:00-15:15)	**Закрытие конференции**		

О ВЛИЯНИИ БИПОЛЯРНЫХ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ДИНАМО В КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЕ СОЛНЦА

Пипин В.В.

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

Исследовано влияние биполярных магнитных областей (БМО) на крупномасштабное динамо, распределенное в объеме конвективной зоны. В исследовании используется нелинейная трехмерная модель динамо среднего поля. Выход БМО на поверхность моделируется с помощью эффекта неосесимметричной магнитной плавучести, действующего на крупномасштабное тороидальное магнитное поле в верхней половине конвективной зоны. Неосесимметричное магнитное поле, возникающее в результате этого механизма, является неглубоким. Вблизи поверхности влияние БМО на генерацию крупномасштабного полоидального магнитного поля превосходит турбулентные эффекты динамо. Однако из-за неглубокого распределения БМО его влияние на глобальное динамо незначительное. В целом, можно сделать вывод о том что фотосферная магнитная активность в форме БМО прекрасно вписывается в сценарий динамо волн Паркера. Наиболее сильный динамо-эффект активности БМО связан с долговременной эволюцией крупномасштабного неосесимметричного магнитного поля. Флуктуации наклона БМО приводят глобальной дестабилизации экваториальную антисимметрии динамои северо-южной асиметрии магнитной активности.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и Высшего образования РФ, проект 075-ГЗ/С3569/278.

УТОЧНЕНИЕ ПРОСТЕЙШИХ МОДЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО И ЛАБОРАТОРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Кузанян К.М.,[1,2] **Клиорин, Н.И.,**[2,3] **Степанов Р.А.,**[2] **Сафиуллин, Н.Т.**[2,4]

[1] *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Троицк,Москва, Россия;* kuzanyan@izmiran.ru

[2] *Институт механики сплошных сред, УрО РАН, г. Пермь, Россия;* rodion@icmm.ru

[3] *Dept. of Mechanical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel;* nat@bgu.ac.il

[4] *Институт радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета, г. Екатеринбург, Россия;*

В уравнениях гидромагнитного динамо средних полей, описывающих генерацию магнитных полей на Солнце, используются тензорные коэффициенты, которые могут быть вычислены в рамках полной модели, разрешающей все масштабы. Однако в силу ограниченности вычислительных мощностей, это практически трудно реализуемо, поэтому при оценках этих коэффициентов зачастую используются весьма общие теоретические представления, в том числе простейшие принципы теории длины перемешивания, или упрощенные представления об изотропности турбулентности и т.п. Это значительно снижает физическую реалистичность моделей.

Проведение прямого численного моделирования (DNS), описывающего конвективные турбулентные течения на всех масштабах, требует колоссальных вычислительных ресурсов. Альтернативой проведению DNS полной задачи является проведение модельных расчетов, которые позволяют провести проверку замыкающих соотношений среднего поля в контролируемых условиях при умеренных числах Рейнольдса (Re).

Для больших чисел Рейнольдса альтернативой этого подхода является лабораторный эксперимент, который позволяет на основе реальной физической системы реализовать конвективные турбулентные течения. Эксперимент в отличие от расчетов позволяет проводить длительные серии измерений, что является ключевым фактором при изучении турбулентных течений. В то же время в некотором диапазоне Re результаты численного и лабораторного экспериментов могут перекрываться, что дает возможность разрешить некоторые трудности проведения лабораторных измерений трехмерных полей.

Надо отметить, что реализация характерных для Солнца значений чисел Рейнольдса и Рэлея невозможна ни в расчетах, ни в экспериментах. Однако построение единой математической модели, адекватно описывающей конвективную турбулентность, наблюдаемую в различных режимах (как в экспериментальных лабораторных установках, так и в астрофизических объектах, на Солнце, звездах и т.п.), является чрезвычайно важным шагом, на основе которого можно строить модели более развитых турбулентных режимов.

Мы предлагаем вместо дорогостоящих и длительных численных расчетов полной задачи провести серию модельных гидродинамических лабораторных и вычислительных экспериментов, которые позволят получить независимые реалистичные оценки тензорных коэффициентов, входящих в уравнения гидромагнитного динамо. На основе знания этих коэффициентов мы надеемся, используя модель солнечного динамо, описать регулярную составляющую динамики солнечной активности на интервалах длительностью от нескольких лет до нескольких десятилетий.

Работа поддержана грантом РНФ 21-72-20067

ГЛОБАЛЬНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОТОКИ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕСЯ КОНВЕКЦИЕЙ И МАГНЕТИЗМОМ НЕДР СОЛНЦА

Старченко С.В.

ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия, sstarchenko@mail.ru

Система уравнений гидромагнитного динамо в конвективной зоне Солнца, прежде всего, базируется на уравнении для порождающей динамо энергии конвекции. Эта энергия формально определяется отклонениями температуры или энтропии от адиабатического состояния. В рассматриваемом простейшем, но, вместе с тем, достаточно детальном приближении подобные отклонения полностью задают Архимедово ускорение плавучести A, направленное параллельно сферическому радиусу, а эволюционное уравнение для энтропии или температуры преобразуется в уравнение для A. Интегрируя это уравнение по сфере радиуса r, получаем радиальный баланс конвективных и диффузионных тепловых потоков. Дальнейшее интегрирование по радиусу приблизительно дает тепловые потоки, усредненные по заданным сферическим слоям, а энергетическое уравнение, как и в [1], сводится к

$$AV=W. \qquad (1)$$

Здесь фигурируют усредненные по соответствующему слою величины: A – Архимедово ускорение, V – скорость течений, W – удельная конвективная мощность слоя в Вт/кг или конвективный тепловой поток. Независимым образом, конвективный тепловой поток определяется из аналогичного интегрирования скалярного произведения скорости динамо-течения **V** на уравнение Навье-Стокса. При этом приблизительно выражаем и глобальную (т.е. по всему рассматриваемому слою) мощность магнитной силы Лоренца, которую вместе с энергетическим потоком магнитной диффузии так же оцениваем и из уравнения индукции (последнего в динамо-системе) магнитного поля **B**.
Окончательно, в рассматриваемом слое, получаем наипростейшее линейное неоднородное дифференциальное уравнение для эволюции суммарной магнитной энергии E в виде

$$\mathrm{d}E/\mathrm{d}t = 2MW - 2E/\tau. \qquad (2)$$

Здесь: M – хорошо известная масса рассматриваемого слоя, а постоянное в рассматриваемом приближении τ – это характерное время магнитной диффузии.

Простейший случай с постоянным во времени W дает стабилизацию энергии на уровне τMW, который хорошо согласуется как с известными моделями глубинной части конвективной зоны [2], так и с ранее рассмотренной автором (из соображений по порядку величины) простейшей моделью пятна или группы пятен [3].
Рассмотрены варианты с изменяющимися во времени по гармоническим законам W, которые согласуются с наблюдаемой в приповерхностной части конвективной зоны магнитной цикличностью при условии контроля ее глубинным динамо.

1. Starchenko S.V., Jones C.A. // Icarus 2002. V. **157.** P. 426-435.
2. Кичатинов Л.Л. // Письма в Астрон. журн. 2019. Т. **45.** С. 45-54.
3. Старченко С.В. // Геомагнетизм и Аэрономия 2022. Печатается.

СОЛНЕЧНАЯ АКТИВНОСТЬ НА РУБЕЖЕ 19-20 ВЕКОВ ПО ОЦИФРОВАННЫМ ДАННЫМ ЦЮРИХСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ

Илларионов Е.А., Арльт Р.

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

Потсдамский астрофизический институт, Потсдам, Германия

Возможность привлечения исторических данных к изучению солнечной активности часто ограничена трудоемкостью процесса оцифровки. Ярким примером являются отсканированные каталоги Цюрихской обсерватории, охватывающие конец 19-го и начало 20-го веков (1883-1936). Архив из 12 книг, объемом от 1 до 2 тысяч страниц, полностью состоит из рукописных таблиц с координатами солнечных пятен, протуберанцев и факелов, наблюдаемых на солнечном диске. Хотя эти данные дополняют популярные и широко используемые гринвичские данные, они остаются недоступными для систематического анализа из-за отсутствия надлежащего метода оцифровки. Мы представляем модель машинного обучения, основанную на комбинации сверточных и рекуррентных нейронных сетей (CRNN), обученных распознавать последовательные текстовые данные (десятичные числа). Модель выдает ранжированный список возможных интерпретаций каждого рукописного числа, а также оценку достоверности каждой интерпретации. Используя внутренние корреляции между табличными данными, мы получаем надежный набор данных об исторических положениях солнечных пятен. В докладе мы остановимся на архитектуре модели и деталях процесса обучения, которые могут быть полезны для других приложений, а также продемонстрируем первые результаты анализа оцифрованного набора данных.

Эпохи солнечной активности – веский аргумент двухуровнего динамо процесса.

В.Н. Ишков

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

Наблюдения солнечной активности (СА) последних трёх солнечных цикла (СЦ) 22–24 с достаточно необычных по своим характеристикам и в какой-то степени нарушавших сложившуюся к концу 20 века картину развития циклов, впервые дали возможность обсудить наиболее вероятный сценарий (тенденцию) солнечной цикличности. Стало ясно, что работать можно только с **достоверным** (1849 – 2020 г.) рядом относительных чисел солнечных пятен, который показывает удивительное постоянство в основных проявлениях развития отдельных 11- и 22-летних СЦ и структура его цикличности показывает периодическую смену **эпох СА**:

– эпохи **пониженной** СА – СЦ12 – 16, 24 и, с большой вероятностью, 4 следующих, когда фоновые значения общего магнитного поля Солнца находятся на самых низких уровнях и энергетики Солнца не хватает на реализацию высоких СЦ ($W^* \geq 135$);

– эпохи **повышенной СА** – СЦ18 – 22, 10 – 8, *7, 6*, последние два гипотетически СА, когда фоновые значения общего магнитного поля Солнца находятся на самых высоких уровнях и не наблюдается низких СЦ ($W^* \leq 82 \rightarrow W^* \leq 130$);

– **переходные периоды** (СЦ **11**, *10;* **23**, *22* и **17**, *18*) примерно в 17 лет между эпохами, захватывающие часть примыкающего СЦ, предыдущего или последующего. В эти периоды (примерно 17–18 лет) меняется характер пятнообразовательной активности: солнечные пятна рождаются в практически переменном общем магнитном поле, либо увеличивающемся, либо уменьшающемся. Таким образом. режим генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца перестраивается к последующей эпохе, что впрямую указывает на то, что СА работает в режиме двух уровневого механизма динамо.

Реальный сценарий СА прямо приводит к заключению, что образование солнечных пятен осуществляется в трёх разных режимах, которые и определяют характер пятнообразовательной активности, давая возможность преобладать либо небольшим группам пятен с пониженной вспышечной активностью, либо образовывать высокоактивные группы пятен сложной магнитной конфигурации. В переходные периоды солнечные пятна образуются в переменном по величине магнитном поле и образуют "смесь" разных допустимых физических условий. Это создаёт условия появления очень динамичных по развитию активных областей с группами пятен не экстремальных по площади (~2–3 10^3 мдп), в которых концентрируются всплытия больших и быстрых новых магнитных потоков, создавая условия осуществления экстремальных вспышечных событий. Внутри эпох с их достаточно стабильных условиях образования активных областей, даже самых больших и сложных, экстремальные вспышечные события не проявляются.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ СПЕКТР ТЕЧЕНИЙ В КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЕ СОЛНЦА И ИХ ВАРИАЦИИ В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Гетлинг А.В., Косовичев А.Г.

НИИЯФ МГУ, Москва, Россия, a.getling@mail.ru

Подповерхностные скорости в конвективной зоне Солнца, определенные методами пространственно-временной гелиосейсмологии, используются для изучения пространственных масштабов течений. Исходные данные получены инструментом Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) на борту орбитальной Обсерватории солнечной динамики (SDO) с мая 2010 г. по сентябрь 2020 г. В работе используются результаты гелиосейсмологической обработки – найденные с 8-часовой временной каденцией поля горизонтальных скоростей на разных глубинах в подфотосферном слое толщиной около 20 Мм в диапазонах широт и отсчитываемых от центрального меридиана долгот от –60° до +60°. Пространственный шаг сетки, на которой определены значения скорости, равен 0.12° по обеим координатам. Масштабы конвективных течений исследуются путем разложения поля дивергенции горизонтальной составляющей скорости по сферическим гармоникам.

Пространственные спектры мощности показывают нарастание характерных масштабов течений с глубиной, причем разномасштабные течения сосуществуют. Самые крупные масштабы приближаются к значениям, соответствующим гигантским ячейкам солнечной конвекции. Степень и порядок гармоники главного спектрального максимума в самых глубоких слоях имеют близкие значения, т.е. гармоники эти близки к секториальным. Это указывает на возможное присутствие ячеек, вытянутых в меридиональном направлении и имеющих заметно меньшие долготные размеры, чем широтные.

Полная мощность течений обнаруживает отчетливую корреляцию с уровнем солнечной активности. В тонком подповерхностном слое эта корреляция отрицательна, а в более глубоких слоях положительна.

ПОТОК МЕЛКОМАСШТАБНОЙ МАГНИТНОЙ СПИРАЛЬНОСТИ В СОЛНЕЧНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЗОНЕ: ТЕОРИЯ И СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

Клиорин Н.И. [1,2] **, Рогачевский, И.В.** [1,3] **, Кузанян К.М.** [4,2] **, Сафиуллин Н.Т.** [5,2] **, Поршнев С.В.** [5] **, Лифшиц И. М.** [6]

[1] *Dept. of Mechanical Engineering, Ben-Gurion University of the Negev, Beer-Sheva, Israel;*
[2] *Институт механики сплошных сред, УрО РАН, г. Пермь, Россия;*
[3] *Nordita, KTH Royal Institute of Technology and Stockholm University, Stockholm, Sweden;*
[4] *Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), г. Троицк,Москва, Россия;*
[5] *Институт радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета, г. Екатеринбург, Россия;*
[6] *Dept. of Geography, Ben-Gurion University of the Negev, P.O.B. 653, 84105, Beer-Sheva, Israel*

Как показали предыдущие исследования, на временных масштабах длиннее года наиболее важным фактором, определяющим как уровень магнитного поле Солнца в целом, так и случайные его вариации, является транспорт мелкомасштабной магнитной спиральности к поверхности Солнца посредством потока этой спиральности. Блокирование этого потока приводит к катастрофическому накоплению мелкомасштабной магнитной спиральности в недрах и как следствие к катастрофическому подавлению генерации крупномасштабного магнитного поля на Солнце. Наоборот, если путь потоку мелкомасштабной магнитной спиральности открыт, уровень среднего поля оказывается вполне сравнимым с наблюдаемым средним полем Солнце, а его динамика становится нетривиальной. Поскольку магнитная часть альфа-эффекта контролируется мелкомасштабной магнитной спиральностью, то для её описания следует использовать динамическое уравнение, получающееся из уравнения для мелкомасштабной магнитной спиральности. Источники этой спиральности хорошо известны: это токовая спиральность крупномасштабного магнитного поля и полный $\alpha(\mathbf{B})$-эффект. В противоположность источникам, поток этой спиральности наименее изучен: его вычисление никогда не проводилось «до конца». Фактически во всех предыдущих исследованиях рассматривались лишь только грубые качественные модели этого потока. В настоящем докладе мы приведём результаты вычислений этого потока для Солнца в рамках теории среднего поля и сравним с имеющимися в литературе моделями. Мы оценим также величину этого потока и сопоставим с наблюдаемым в активных областях Солнца потоком магнитной спиральности.

Работа поддержана грантом РНФ 21-72-20067.

ПИКОВСПЫШКИ, НАБЛЮДАЕМЫЕ SOLAR ORBITER, НА ПОЛПУТИ К СОЛНЦУ

Подладчикова Е.В.[1]

[1]*Физико-метеорологическая обсерватория и всемирный радиационный центр, Давос PMOD/ WRC, Dorfstrasse 33 CH-7260 Davos Dorf, Switzerland epodlad@gmail.com*

Анализируя систематические наблюдения солнечной короны Паркер (1998) определил понятие нановспышкек с минимальной возможной энергией 10^{24} эрг, оценив доступную свободную энергию в длинной, скрученной конвекцией, магнитной петле активной области, и предсказал возможность наблюдения более мелких вспышек телескопами следующего поколения. Ашванден (2000), анализируя свойства петель наблюдемых УФ телскопами EIT, TRACE и STEREO, предположил невозможность существования более мелких событий, чем нановсышки.

Находясь на полпути к Солнцу космический аппарат SOLAR ORBITER с УФ телескопом рекордно высокого разрешения (3056x3056 пикселей) просканировал зону очень спокойного Солнца (2.46 % солнечной поверхности) с временным разрешением 2-5 секунд, получив серию из 50 изображений в корональной линии 174 Å, во время фазы глубокого минимума солнечной активности. Были обнружены вспышечные явления (так называемые campfires) с минимальным размером 200 км (Berghmans, 2021) (ограниченным разрешающей способностью телескопа) и с минимальной энергией вплоть до 10^{20} эрг, соотвествующей пикосвышкам (Podladchikova, 2021). Все обнаруженные в этих данных пиковспышки рапределены по степенному закону с показателем около 2 в диапазоне 10^{20}-10^{24} эрг, ненаблюдавшемся ранее.

Позиция SOLAR ORBITER на угловом расстоянии 35 градусов от линии Земля - Солнце впервые позволила применить метод триангуляции двух стереоскопических изображений пиковспышек, для определения их высот (Жуков, 2021). Такие высоты обычно неопределимы по данным лишь одного телескопа из-за оптической прозрачности плазмы в короне. Полученные неожиданно низкие высоты 750-4500 км соответствуют транзитной зоне короны с плазменной бета меньше единицы, что благоприятствует формированию квазипараллельных магнитному полю токов, которые, возможно, объясняют происхождение наблюдаемых пиковспышек. Суммарная тепловая энергия полученных пиковспышек составляет 2.7% от общего количества энергии необходимой для нагрева и поддержания солнечной короны. Эта дополнительная энергия не наблюдалась ранее.

К ВОПРОСУ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Тимофеев В.Е.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

vetimofeev@ikfia.ysn.ru

В работе рассматривается наиболее изученный вид солнечной активности – изменение числа солнечных пятен, а именно числа Вольфа W. Плотность корпускулярной энергии Солнца P, выделяемой в форме энергии солнечного ветра, будет определяться суммой его тепловой и кинетической энергии:

$$P = nkT + m_p nv^2/2,$$

где m_p, n, v и T – соответственно масса, концентрация, скорость и температура протонов в солнечном ветре на орбите Земли, k – постоянная Больцмана. Первый член суммы – это термодинамическое давление солнечного ветра, второй – плотность его кинетической энергии. Плотность магнитной энергии Солнца E на орбите Земли можно оценить по данным величины B модуля ММП:

$$E = B^2 / 8\pi .$$

Показано, что прямой зависимости плотности корпускулярной энергии P от числа солнечных пятен W практически нет. Более того, 11-летние вариации P составляют в среднем всего ≈15% и по фазе не совпадают с вариациями W (чисел Вольфа). В основном, эта энергия обусловлена не образованием солнечных пятен, а энергией расширения солнечной короны и общим истечением солнечной плазмы. В то же время 11-летние вариации модуля ММП значительно лучше совпадают по фазе с вариациями W и имеют гораздо большую амплитуду – в среднем 53%. Вместе с тем достаточно ярко проявляется синхронность временного хода плотности магнитной энергии E и числа солнечных пятен W. Отсюда следует, что функциональная зависимость в основном проявляется только между числами Вольфа и модулем ММП.

Величина отношения $\Delta E/\Delta W$ в среднем на орбите Земли будет равна (0.677±0.321) (эВ/см^3) / (ед. числа Вольфа). На поверхности Солнца с учетом квадрата расстояний этот коэффициент будет равен $(3.39\pm1.61)\cdot10^4$ (эВ/см3) / (ед. W), т. е. одна единица чисел Вольфа эквивалентна выделению энергии $3.39\cdot10^4$ эВ/см^3.

Это относительно малая плотность энергии равна всего ≈ $5.4\cdot10^{-8}$ эрг/см^3 ($3.39\cdot10^4$ эВ/см^3), но она может заметно повлиять на запуск процессов образования пятен. Таким образом, любой внешний процесс, который выделит в недрах Солнца в области образования пятен такую порцию энергии, может повлиять на солнечную активность на единицу числа Вольфа.

Работа была выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №АААА-А21-121011890014-0

ОЦЕНКА СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ЦИКЛОВ МИНИМУМА ДАЛЬТОНА ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ ДОСТОВЕРНЫХ ЦИКЛОВ РЯДА ЧИСЕЛ ВОЛЬФА

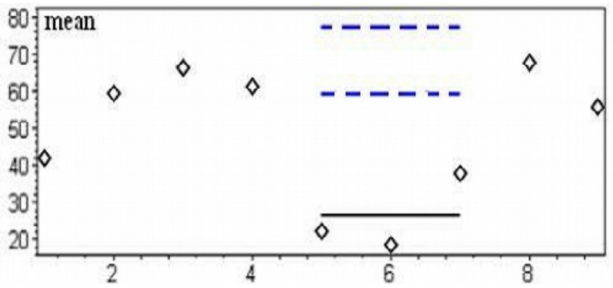
Шибаев И.Г.

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

Во многих исследованиях опираются на цюрихский ряд среднемесячных чисел Вольфа W (W = Wrest U Wtool), который включает восстановленный ряд Wrest (с 1749 г. по 1849 г.) и ряд достоверных данных Wtool (регулярные инструментальные наблюдения с 1849 г. по настоящее время). Но свойства восстановленных и достоверных данных значительно разнятся, т. к. при формировании ряда Wrest [1] объединялись отрывочные данные с различными плотностью наблюдений, амплитудным разрешением и масштабированием, что исказит локальные характеристики регистрируемого процесса и взаимосвязь временных фрагментов разного масштаба. Мы имеем не только несогласованность характеристик рядов Wrest и Wtool [2], но и противоречивость параметров самого ряда Wrest [3], но на это обращают мало внимания, хотя влияние этих факторов не оценивалось.

Другие авторы, считая восстановленные данные ненадежными, опираются только на достоверный ряд чисел Вольфа Wtool. При этом «повисают» понятия (структуры) сформированные с опорой хотя бы на часть ряда Wrest. Цикл Гляйсберга [4] – яркий пример тому, т. к. понятие «цикл Гляйсберга» возникло из анализа небольшого объема данных, имеющих различную степень достоверности, и с ключевой ролью циклов V÷VII (минимум Дальтона) из восстановленного ряда, а рост периода цикла Гляйсберга с увеличением доли достоверных данных [5] хорошо это иллюстрирует. Разумная коррекция восстановленных данных может снять ряд противоречий и позволит опираться на расширенный массив данных.

В данной работе рассмотрен вариант групповой коррекции средних значений восстановленных циклов. Так как при сопоставлении протяженных фрагментов локальные невязки данных играют меньшую роль, то опираясь на интегральные оценки этих фрагментов (без детализации их «сложной» истории формирования) мы получаем более взвешенные интервальные оценки. Параметры интервалов (групп циклов) ряда Wtool служат основой коррекции. Опираясь на эмпирическую зависимость длительности достоверных циклов Tc от их максимума Wm, легко увидеть, что для циклов минимума Дальтона эта связь наиболее искажена.



Естественно рассмотреть сценарии с акцентом на согласование параметров восстановленного ряда через **коррекцию минимума Дальтона.** Средние значения циклов I ÷ IX представлены на рисунке, где сплошной линией отмечено среднее (~ 26.48) от средних значений циклов V÷VII. Варианты скорректированных средних значений циклов V÷VII отмечены пунктирами. Видно, что коррекция, естественным образом, приведет к росту периода цикла Гляйсберга.

[1] David H. Hathaway The Solar Cycle / https://arxiv.org/pdf/1502.07020.pdf, 2015.
[2] Shibaev I. G. Estimation of the reconstructed part of the Wolf series and the possibility of its correction. Solar System Research, V. 42, № 1, P. 63-71, 2008.
[3] Shibaev I. Old and new versions of wolf sunspot numbers: consistency of characteristics for restored and instrumental parts of series / Proceedings of 15th International Scientific Conference "Space, Ecology, Safety" SES'2019. Sofia, Bulgaria, P. 37 – 41, 2019.
[4] Gleissberg W. A long-periodic Fluctuation of the Sun-spot Numbers // Observatory, V. 62, P. 158, 1939.
[5] Shibaev, A. Connection between period of low-frequency component Wolf's numbers (WNS) and length of Wolf's numbers series // Aerospace Research in Bulgaria, V. 29, P. 5–9, 2017.

ДОЛГОТНАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

Гаврюсева Е.А.

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

Был проведен анализ структуры и динамики фотосферного магнитного поля на протяжении четырех полных солнечных циклов с 21 по 24 включительно.

Целью настоящего исследования было вычислить период дифференциального вращения крупномасштабного фотосферного магнитного поля, изучить его поведение во времени и выяснить, имеется ли долготная структура. Однако выбор системы координат, в которой следует вести ее поиски, далеко не однозначен. Это тесно связано с тем, что вращение Солнца дифференциально по широте и изменяется с глубиной и со временем. На базе наблюдательных данных Солнечной Обсерватории им. Дж. Вилкокса за четыре полных цикла солнечной активности 21–24 был вычислен период вращения магнитного поля на различных широтах и его изменение во времени.

Найдена уникально стабильная на протяжении 45 лет долготная структура магнитного поля. Обнаружено, что скорость ее вращения совпадает с той, с которой вращается основание конвективной оболочки, то есть структурирование магнитного поля Солнца происходит в тахоклине. Этот результат наглядно демонстрирует теснейшую связь процессов солнечной активности с топологией магнитных полей, с их динамикой и глубинной стратификацией.

Была изучена геометрическая структура долготной секторной структуры, ее временное поведение от одного цикла к другому, устойчивость и изменение ее амплитуды.

Изучение глобальной структуры крупномасштабного магнитного поля Солнца исключительно важно для создания теоретической модели динамики Солнца и предсказаний реальной обстановки в гелио- и геомагнитосфере.

ПАРАМЕТРЫ ЗОНАЛЬНЫХ ГАРМОНИК МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

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

ИЗМИРАН, г.Троицк, г.Москва, Россия; МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

as.shibalova@physics.msu.ru

Параметры зональных гармоник (в частности, изменение напряженности поля гармоноки $l=3$ и мультипольных индексов) является одним из трассеров, позволяющих строить прогнозы о мощности последующих циклов солнечной активности.

Согласно моделям солнечного динамо полоидальное магнитное поле возникает из тороидального благодаря дифференциальному вращению солнечного вещества. Постепенное уменьшение напряженности полоидального поля к последнему циклу активности позволяет предположить, что 25-й цикл будет не более интенсивным, чем 24-й. Наблюдения полярного поля дают такой же результат.

В работе также рассмотрены некоторые особенности 23 и 24 циклов активности на основании анализа зональных гармоник.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 20-02-00150, 18-02-00085 и 19-52-53045) и фонда БАЗИС (18-1-1-77-3).

1. Obridko V.N., Sokoloff D.D., Pipin V.V., Shibalova A.S., Livshits I.M. // JASTP, Vol.225, 105743 (2021)

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБНАРУЖЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ МАГНИТНЫХ ВИХРЕЙ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Воробьев Д. Л.[1], Блуменау М. И.[1], Фридман М. Л.[1,2], Хабарова О. В.[2], Обридко В. Н.[2]

[1] НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, dlvorobev@edu.hse.ru
[2] ИЗМИРАН, г. Москва, Россия

Предложен новый метод автоматического обнаружения солнечных магнитных торнадо, базирующийся на методах компьютерного зрения. Магнитные торнадо — это магнитоплазменные образования в короне Солнца с закрученным магнитным полем. Есть указания на то, что в них также вращается и вещество. При этом из-за трехмерности структур и особенности их пространственной и временной динамики теоретическое описание и численное моделирование этих объектов полностью нереализуемы [Wedemeyer-Böhm et al, 2012, Nature]. Размеры магнитных торнадо варьируются от 10^2 до 10^6 км, а время жизни от нескольких минут до многих часов. На данный момент достаточно мало работ посвящено их исследованию, и не существует широко известных алгоритмов, которые бы позволяли их детектировать машинными методами. Недостаточное количество выявленных случаев является одной из многих проблем, не позволяющих анализировать особенности этих структур и связанные с ними процессы. В частности, данные нитевидные закрученные образования хорошо наблюдаемы только на лимбе, а на диске же можно только догадываться об их наличии.

В нашем методе за основу берутся изображения SDO/AIA в длинах волн 171 Å, 193 Å, 211 Å и 304 Å, к которым применяется несколько различных алгоритмов (свёртки с фильтрами, свёрточная нейронная сеть и градиентный бустинг). Новая методика является комбинацией нескольких подходов (трансфер обучение, стекинг), находящих широкое применение в различных сферах анализа данных. Такой подход позволяет детектировать интересующие нас структуры за малое время с достаточной точностью. В качестве тестовых структур использовались магнитные торнадо, ранее описанные в научной литературе [Wedemeyer et al 2013, ApJ; Mghebrishvili et al. 2015, ApJ]. Наш метод позволил детектировать структуры, известные ранее, а также выявить новые.

СВОЙСТВА БИПОЛЕЙ В ЦИКЛАХ 15-24 ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ В “БЕЛОМ” СВЕТЕ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПЯТЕН

Тлатов А.Г., Скорбеж Н.Н., Тлатова К.А., Васильева В.В. , Сапешко В.И.

ГАС ГАО РАН, г. Кисловодск Россия, Россия, tlatov@mail.ru

Выполнена оцифровка солнечных пятен на фотопластинках Кисловодской Горной астрономической станции (KMAS) за период 1956-2021 гг. и Гринвичской обсерватории (RGO) за период 1917-1972 гг. Полученные данные использовались для анализа углов наклона групп солнечных пятен и отдельных солнечных пятен. Данные наблюдений в “белом” свете сравнивались с данными углов наклона магнитных биполей, полученные при оцифровке магнитных полей солнечных пятен обсерватории Маунт Вилсон (MWO) за период 1917-2021 гг.[1].

Рассмотрены особенности распределения углов наклона биполей в зависимости от методики подсчета: между кластерами ведущей и хвостовой полярности, между наибольшими пятнами противоположной полярности в группе. Для наблюдений в “белом” свете между наибольшим пятном и другими пятнами в группе, между двумя наибольшими пятнами в группе, и другие методы.

Подтверждено, что на высоких широтах в законе Джоя зависимости от углов наклона биполей от широты существует насыщение. Также существует различие углов наклона для четных и нечетных циклов.

Показано, что закономерности для углов наклона групп солнечных пятен проявляются и для отдельных солнечных пятен, особенно для максимального пятна в группе. Так ось пятна, как правило, имеет угол наклона к солнечному экватору, противоположный в северном и южном полушарии, причем угол наклона увеличивается с ростом широты.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 1021032422589-5.

1. Tlatova K.A., Tlatov A.G., Pevtsov A.A. et al. //Solar.Phys., 2018, V.293, P.118.

ПОЛУШАРНАЯ АСИММЕТРИЯ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В ЭПОХУ SDO

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

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

Используя базу Гелиофизических событий HEK - Heliophysics Event Knowledgebase, мы анализируем полушарную асимметрию корональных дыр (coronal holes, CHs) в эпоху наблюдений Solar Dynamic Observatory (SDO) (13.05.2010-31.12.2021). Мы показываем, что асимметрия полярных и неполярных корональных дыр значительно изменяется во времени, и что характер этих изменений явно связан с циклом солнечной активности. В работе отмечается, что по полярным CHs большую часть рассматриваемого периода доминировало южное полушарие, а по неполярным - преимущественно северное. Мы показали, что максимум и минимум северо-южной асимметрии площадей неполярных CHs близки по времени к максимуму и минимуму асимметрии индексов солнечной активности (числа и площадей солнечных пятен). Их максимум асимметрии приходится на минимум цикла и переход от 24-го цикла к 25-му; минимум - на ветви роста и первый максимум 24-го цикла. Для полярных CHs максимальная асимметрия площади наблюдается на максимуме, а минимальная - в минимуме 24-го цикла. Это еще раз подтверждает наше предположение о том, что эти два типа CHs имеют разную природу, а неполярные CHs и пятна являются элементами общей магнитной активности.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ПОВЕРХНОСТИ СОЛНЦА

Куценко А.С., Абраменко В.И.

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

Дифференциальное вращение Солнца является одним из определяющих механизмов для работы глобального солнечного динамо, что обуславливает интерес к его детальному изучению. Скорость вращения плазмы на поверхности Солнца максимальна на экваторе и постепенно уменьшается при приближении к полюсам. Интересно, что скорость вращения различных структур, обычно связанных с выходящим на поверхность магнитным потоком, не соответствует скорости вращения плазмы для данной широты. Кроме того, даже для различных трассеров, расположенных на одной широте, могут наблюдаться как различия в скорости вращения, так и вариации скорости во время эволюции трассера.

Различия в скорости вращения магнитных структур часто объясняют при помощи гипотезы магнитных корней – скорость трассера определяется скоростью вращения внутренних слоев плазмы, в которых укоренены магнитные жгуты, формирующие его. При таком подходе вариации скорости вращения могут интерпретироваться как подъем магнитных корней через конвективную зону.

Мы полагаем, что немаловажную роль играет несовершенство методики измерения скоростей вращения. Например, группы пятен, которые наблюдаются регулярно уже более 150 лет, часто используются для анализа дифференциального вращения Солнца. Скорость вращения групп пятен обычно измеряется по движению взвешенного по площади центра группы в белом свете. В этом случае, при более быстром распаде хвостовой части группы, центр тяжести смещается в сторону ведущей полярности, что приводит к видимому искусственному смещению центра группы и, соответственно, ошибках в измерении скорости вращения. На этот эффект впервые обратил внимание Кристоф Петровай [1].

В этой работе мы хотим определить, насколько указанный эффект может влиять на измеренную скорость вращения активных областей. Мы провели сравнение скоростей вращения более 600 активных областей, наблюдавшихся с 2010 по 2016 гг. Скорости вращения измерялись по движению средневзвешенного по интенсивности центра активной области на изображениях в белом свете, а также по движению центра активной области, определенного из карт продольного магнитного поля. Оказалось, что для би-/мультиполярных активных областей изображения в континууме приводят к систематически большей измеренной скорости вращения активной области. В среднем, изображения в белом свете дают на 0.45 градуса в день большую скорость по сравнению с магнитограммами. Эта величина сопоставима с изменением скорости вращения Солнца на экваторе и на широте 30 градусов, т.е. погрешности измерения скорости могут быть больше, чем вариации дифференциального вращения во всей королевской зоне Солнца. Мы полагаем, что указанный выше эффект требует учета при анализе вариации скоростей вращения активных областей.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 18-12-00131.

1. Petrovay K. // in Zirin H., Ai G.,Wang H., eds., ASP Conf. Ser. The Magnetic and Velocity Fields of Solar Active Regions. Astron. Soc. Pac., San Francisco, 1993 V. **46**, P. 123

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ

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

КрАО РАН, п. Научный, plotnikov.andrey.alex@yandex.ru

Рядом работ упоминается взаимосвязь между полным беззнаковым магнитным потоком активной области и ее интегральным ультрафиолетовым излучением в линии 304 Å [1]. Данный факт позволяет, к примеру, использовать данные инструмента STEREO для оценки магнитного потока областей, находящихся вне видимого диска Солнца [2].
В то же время замечено, что для ряда униполярных областей наблюдаемое излучение оказывается значительно слабее ожидаемого из упомянутой зависимости: свечение над пятном оказывается меньше, чем над слабой эфемерной областью (Рис. 1).

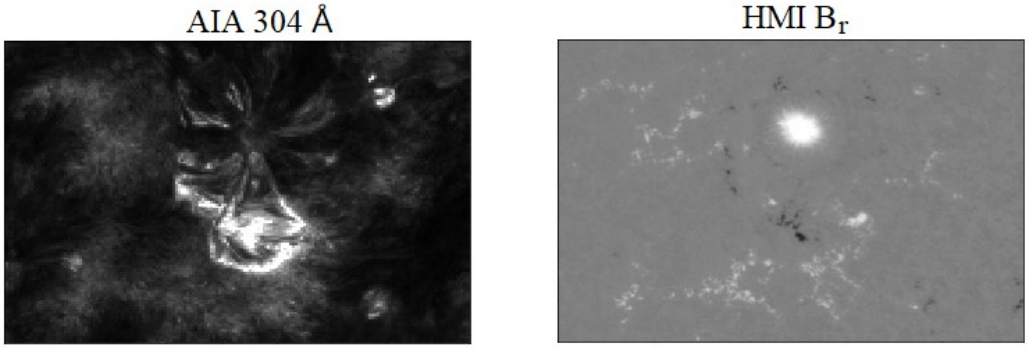


Рис. 1. УФ излучение над униполярным пятном слабее, чем над заметно меньшей биполярной областью

По данным спутника SDO проведено сравнение полного беззнакового магнитного потока и плотности ультрафиолетового излучения в линии 304 Å для более чем 200 активных областей, наблюдаемых с 2010 по 2016 год.
На основании выборки получено, что униполярные АО в среднем генерируют значительно меньшую плотность УФ излучения по сравнению с биполярными и мультиполярными областями.

1. Schrijver, C.J. // A&A 1987. V. **180** P. **241**
2. Ugarte-Urra I. et al.// ApJ 2015. V. **815** P. **9**

СИБИРСКИЙ РАДИОГЕЛИОГРАФ — НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ

Лесовой С.В., Губин А.В., Глоба М.В., Кочанов А.А., Алтынцев А.Т., Уралов А.М.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, svlesovoi@gmail.com

Современные задачи солнечной физики требуют создания новых инструментов. Требования к новым солнечным радиотелескопам сформулированы довольно давно — современный солнечный радиотелескоп должен измерять спектры в каждой точке Солнца в обеих круговых поляризациях с приемлемыми спектральным, временным и пространственным разрешениями (imaging spectroscopy). В настоящее время в мире не существует реализованных проектов, удовлетворяющих этим требованиям. Сибирский радиогелиограф, сооружение которого завершается в ИСЗФ СО РАН, пожалуй, наиболее близко соответствует данным требованиям.

В докладе приведены детальные технические характеристики Сибирского Радиогелиографа, способы управления антеннами, покрытие uv-плоскости и методы калибровки видностей. Представлено программное обеспечение, позволяющее восстанавливать изображения из исходного набора видностей. Описываются дополнительные виды данных, получаемых Сибирским радиогелиографом: потоковые и корреляционные спектры, динамические спектры активных областей. Обсуждаются новые возможности исследования солнечной короны с использованием наборов изображений и дополнительных видов данных.

Приведены примеры наблюдения сверхслабых всплесков, с потоками до 100 Янских, примеры динамических спектров гирорезонансных источников, волокон и протуберанцев.

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ МИЛНА-ЭДДИНГТОНА В ЗАДАЧЕ ИНВЕРСИИ СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ: НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД

Князева И.С., Мистрюкова Л.А., Хижик А.И., Мелихедов А.С., Плотников А.А., Гущин М.И., Деркач Д.А.

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

Данная работа является продолжением проекта по определению параметров солнечной атмосферы на основе спектрополяриметрических данных, а именно профилей параметров Стокса. Реализация этой задачи необходима для обработки экспериментальных данных нового современного спектрополяриметра, который сейчас создается на базе телескопа БСТ-1 Крымской астрофизической обсерватории. Модельные профили параметров Стокса можно получить в результате численного или аналитического решения уравнения переноса излучения в намагниченной плазме в рамках какой-то модели атмосферы. Чаще всего данная оптимизационная задача решается методом Левенберга-Марквардта, однако из-за вычислительных ограничений и неопределенности в выборе начального приближения было принятно решение использовать нейросетевой подход для восстановления параметров. Для решения было предложено несколько архитектур и получено достаточно высокое качество восстановления параметров, достигаемое на модельных данных [1]. С учётом дальнейшего использования восстановленных параметров для построения теоретических моделей, с разной чувствительностью к начальным данным, важным условием использования методов является наличие способа оценки неопределённости восстановленных параметров. Кроме того, в том случае, когда происходит перенос решения с модельных данных на реальные, скорее всего, будет наблюдаться сдвиг в решении, и оценка неопределенности нужна для определения степени доверия к нему. В связи с этим, адекватная оценка неопределенности решения является настолько же важной задачей, как и получения самого решения.

Классические методы машинного обучения не предоставляют простого способа оценки оценки неопределённости полученного результата. Стандартные статистические методы не работают в связи с большим количеством параметров в нейронных сетях. На текущий момент можно выделить несколько ключевых подходов, включающих использование байесовских нейронных сетей, ансамблей нейронных сетей, гауссовские процессы [2]. Также можно использовать подход, предложенный К. Бишопом [3] еще в 1994 году (Mixture Density Network), под которую можно адаптировать практически любую детерминистическую архитектуру с помощью модификации выходного слоя. А именно, для задачи регрессии, количество выходов в последнем линейном слое, предсказывающем значения параметров, удваивается и вместо предсказания самого таргета, предсказываются параметры нормального распределения с неким средним значением и дисперсией, из которого целевое значение могло получится. Далее максимизируется функция правдоподобия. Таким образом, в выходном слое предсказывается не только параметр, но и ошибка. В этом докладе мы представим метод оценки неопределённости для восстановленных параметров, а также покажем, что полученные доверительные интервалы обладают необходимыми статистическими свойствами для дальнейшего использования.

1. Knyazeva I., Plotnikov A., Medvedeva T., Makarenko N. (2022) // Advances in Neural Computation, Machine Learning, and Cognitive Research V. NEUROINFORMATICS 2021. Studies in Computational Intelligence, vol 1008. Springer, Cham.
2. Gawlikowski, Jakob, et al. // *arXiv preprint arXiv:2107.03342* (2021).
3. Bishop, Christopher M. "Mixture density networks." (1994).

ЦИКЛЫ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ПЯТЕН ПО ИЗМЕРЕНИЯМ НА БСТ-2 КРАО РАН: ОСОБЕННОСТИ И ПРОГНОЗ

Ахтемов З.С. , Цап Ю.Т., Малащук В.М.

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

На основе визуальных спектральных наблюдений расщепления зеемановских компонент линии FeI 6302.5 Å, проведенных на Башенном солнечном телескопе (БСТ-2) КрАО РАН, исследована эволюция максимальных значений магнитного поля солнечных пятен с 22-го по 25-ый цикл активности Солнца (1986 - 2021 гг.), напряженность которых ≥ 1500 Гс. Магнитные поля и числа Вольфа усреднялись за различные промежутки времени - год, полгода и четверть года. Полученные таким образом временные ряды сглаживались методом скользящего среднего. Коэффициент корреляции Пирсона за период с 1986 по 2008 гг. для усредненных за год значений магнитного поля и чисел Вольфа в среднем оказался равным 0.68 ± 0.16, тогда как за период с 2008 по 2021 гг. его значение составило 0.24± 0.29. Как следует из анализа временных профилей, усредненные значения чисел Вольфа опережают изменения напряженностей магнитного поля пятен в 22, 23 и 24 циклах (1986 – 2019 гг.) приблизительно на 1 год. Корреляция между амплитудами исследуемых величин, имеющих существенно разную глубину модуляции, не обнаружена — напряженности имеют максимум в 23 цикле, тогда как значения чисел Вольфа монотонно уменьшаются. В свете теории динамо обсуждаются следствия полученных результатов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006).

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА

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

ИЗМИРАН, СПб филиал, Россия, С.-Петербург elenavernova96@gmail.com

Синоптические карты фотосферного магнитного поля Национальной Солнечной Обсерватории Китт Пик за 1978-2016 гг. использовались для изучения распределения положительных и отрицательных магнитных полей по поверхности Солнца.

На основе синоптических карт были получены диаграммы широта-время для магнитных полей различной напряженности. Были рассмотрены диаграммы широта-время отдельно для положительных и для отрицательных полей, а также для дисбаланса положительных и отрицательных полей. Особое внимание уделено слабым магнитным полям. Для выделения слабых магнитных полей на каждой синоптической карте были оставлены без изменения только пиксели с напряженностью $|B| \leq 5$ Гс, а поля $B > 5$ Гс и $B < -5$ Гс были заменены предельными значениями +5 Гс и -5 Гс соответственно. Преобразованные синоптические карты были использованы для построения диаграммы широта-время, на которой подавлено влияние сильных полей.

На полученной, таким образом, диаграмме отчетливо видны наклонные полосы, образующиеся вследствие поочередного доминирования полей положительной и отрицательной полярности, дрейфующих от экватора к полюсам Солнца. Эти полосы имеют ширину около одного года, т.е. изменение полярности происходит с периодом около двух лет. Такая структура наблюдается в интервалах времени 8-10 лет в обоих полушариях Солнца. Причины появления подобной структуры, обнаруженной в работах [1,2], в настоящее время не получили объяснения. Утверждение, что волнообразные изменения полярности всегда присутствуют в фотосфере Солнца [2] несколько отличается от наших выводов: в период около переполюсовки полярного магнитного поля вместо этих полос появляются более широкие потоки, по-видимому так называемые *Rush-to-the-Poles*. Раздельное рассмотрение диаграмм широта-время для положительных и отрицательных полей показало, что смена доминирующей полярности в этих полосах связана с противофазным изменением положительных и отрицательных полей: возрастание положительного поля сопровождается падением модуля отрицательного поля и наоборот.

1. Vecchio A., Laurenza M., Meduri D., Carbone V., Storini M. // ApJ. 2012. V. **749.** P. 27.
2. Ulrich R. K., Tran T.//ApJ. 2013. V. **768**. P. 189.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ПАРКЕРОВСКОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО ДИНАМО

Серенкова А.Ю., Соколов Д.Д., Юшков Е.В.

Физический факультет, МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,
serenkova.ai19@physics.msu.ru

Одной из первых моделей, описывающих генерацию крупномасштабного магнитного поля Солнца, является модель Паркера [1]. Эта модель была получена из уравнения магнитной индукции, усредненного по турбулентному зеркально-несимметричному потоку плазмы, соответствующему конвективной оболочке Солнца.

Разделение магнитного поля на полоидальную и тороидальную компоненты позволяет записать это уравнение в виде системы двух уравнений в частных производных (по времени и по широтному углу). Одним из наиболее известных упрощений данной системы является так называемая маломодовая модель, в которой обе компоненты раскладываются в ряд Фурье по углу, что сводит задачу к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с двумя параметрами, отвечающими за спиральность (зеркальную несимметричность) потока и дифференциальное вращение конвективной оболочки. В работе исследуется поведение данной системы в предположении, что ее параметры слабо осциллируют со временем. Данное предположение выглядит разумным в силу периодичности самого динамо процесса (одиннадцатилетнего солнечного цикла).

Особый интерес при этом возникает к явлению параметрического резонанса [2]. Для лучшего понимания поведения систем с параметрическим резонансом в работе, кроме того, рассмотрены две упрощённые системы из двух дифференциальных уравнений. На их примере анализируются различные режимы (генерация, затухание, развязывание), изменение высоты и ширины резонансных пиков, а также их положение.

В рамках доклада мы стараемся ответить на следующие вопросы: на каких частотах происходит параметрический резонанс в такой сложной системе, насколько при этом повышается энергия осцилляций магнитного поля, как на параметрический резонанс влияют свойства конвективной оболочки и может ли такой резонанс в системах двойных звезд (звезд-планет) приводить к звездным вспышкам повышенной интенсивности.

1. *Parker, E. N.* Hydromagnetic Dynamo Models // Astrophys. J. V. 122. P. 293. 1955.
2. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Курс теоретической физики I. Механика. // Москва. Наука. С. 103—109. 1973.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ХАРАКТЕРНЫХ ВРЕМЕН ВАРИАЦИЙ ДИНАМО СОЛНЦА И ПРОГНОЗЫ ВЕЛИЧИН МАКСИМУМОВ АКТИВНОСТИ

Старченко С.В., Яковлева С.В.

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк, г. Москва, Россия
e-mail: sstarchenko@mail.ru

Мы определяем время вариации как отношение исследуемой величины к ее временной производной. Предлагается оригинальное статистическое исследование времен вариации T среднегодовых чисел Вольфа. Отмечено большое бимодальное отклонение T от нормального распределения, см. Рис.1.

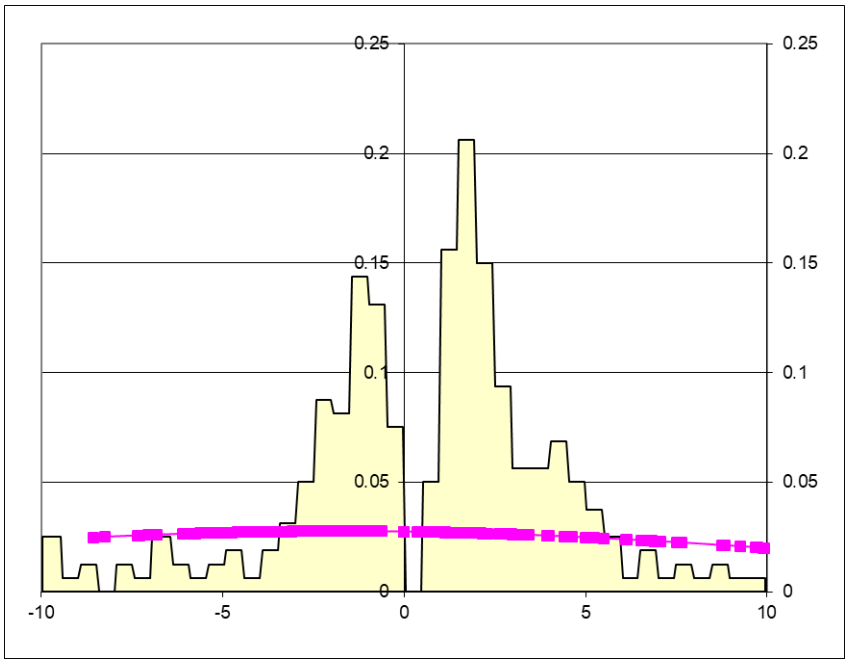


Рис.1. Ступенчатая функция распределения вероятности. По вертикальной оси - плотность вероятности (в 1/год) для распределения времен вариаций T (в годах по горизонтальной оси). Красным – нормальное распределение с теми же средним и дисперсией.

Наиболее вероятное значение T = -1.6 лет, а медианное и среднее: -1.3 и -1.8 лет. Для оценки периодичности вариаций времена T умножаются в несколько раз.

Среднеквадратичное T=15 лет велико, что обусловлено «тяжелыми хвостами» с достоверным максимумом 35 и, по-видимому, недостоверным минимумом -150 лет.

Обоснована (частичное обоснование см. Рис.2) методика прогнозов величины максимумов активности (в числах Вольфа Wmax) по предшествующим им значениям временной производной от числа Вольфа W′.

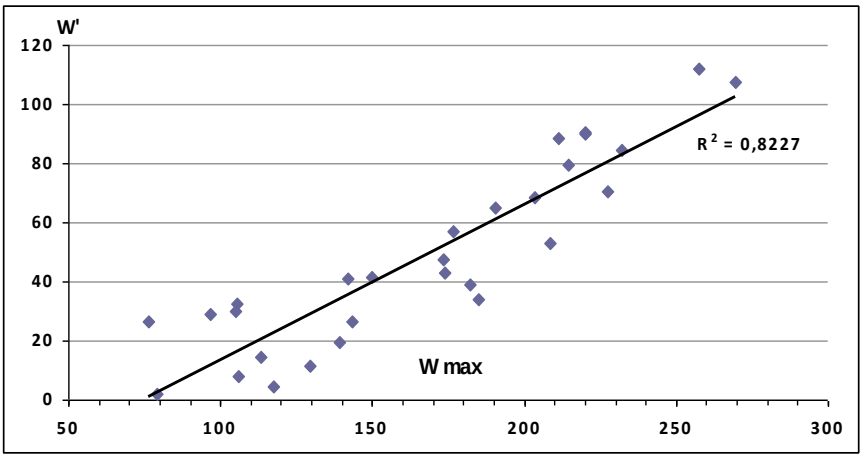


Рис.2. Корреляция значений чисел Вольфа Wmax в максимумах солнечной активности с предшествующими (за год) производными W′ (в 1/год).

Динамо оценки дают радиальную скорость и альфа эффект ~ 1 м/с, что свидетельствует о глубинном залегании источников наблюдаемых солнечных пятен.

Текущий 25 цикл солнечной активности: начальный этап

В.Н. Ишков

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

Текущий 25 цикл, второй цикл второй же эпохи пониженной солнечной активности (СА), начался в январе 2020 г. и темп его развития на сентябрь 2021 г. (20 месяцев) всё более соответствует начальному периоду развития солнечных циклов (СЦ) средней величины. Окончательный вывод о величине текущего цикла можно будет сделать после 24 месяцев наблюдения сглаженных относительных чисел солнечных пятен, т.е. в июне 2022 г., когда по правилу Вальдмаера кривая развития окончательно определится. Над отметить, что на статистике достоверных (10-24) СЦ внутри эпох СА, наблюдательные правила и закономерности неуклонно выполнялись.

За период на июнь 2021 г. на видимом диске Солнца наблюдалось не менее 80 групп пятен. Первая устойчивая (≥7 сут) группа пятен образовалась 24.01.2020, а следующая только 17.10. С 12.04.2021 группы пятен наблюдаются постоянно. На декабрь 2021 осуществились 2 вспышки рентгеновского класса X, 16 – класса M, 4 протонных события, причём оно из них вызвало возрастание на наземных нейтронных мониторах (28.10.2021 г.), и не менее 30 выбросов солнечных волокон, не менее 5 малых (рекуррентных). В геомагнитном поле зарегистрированы 25 магнитных бурь: 2 большие и одна умеренная. Таким образом, по всем показателям активности текущий СЦ превосходит прошедший низкий СЦ24, но значимо уступает циклам средней величины эпох повышенной СА и переходным между эпохами циклам 17 и 24.

SPECTRAL PROPERTIES OF MAGNETIC ENERGY AND CURRENT HELICITY SPATIAL DISTRIBUTIONS IN A SOLAR ACTIVE REGION

Kirill Kuzanyan [1,2] **, and Rodion Stepanov** [2]

[1] *IZMIRAN, Moscow, Russia, kuzanyan@izmiran.ru*

[2] *Institute of Continuous Media Mechanics, Russian Academy of Sciences, Ural Branch (ICMM), Perm, Russia, rodion@icmm.ru*

We use advances of wavelet transform for scale analysis of magnetic energy and current helicity in an active region of the sunspots. We obtain spatial distributions of magnetic energy and current helicity at different scales. Inhomogeneity and local anisotropy are discussed. The study is aimed to clarify the physics underlying behind the observational phenomena: MHD turbulence under rotation and external magnetic field.

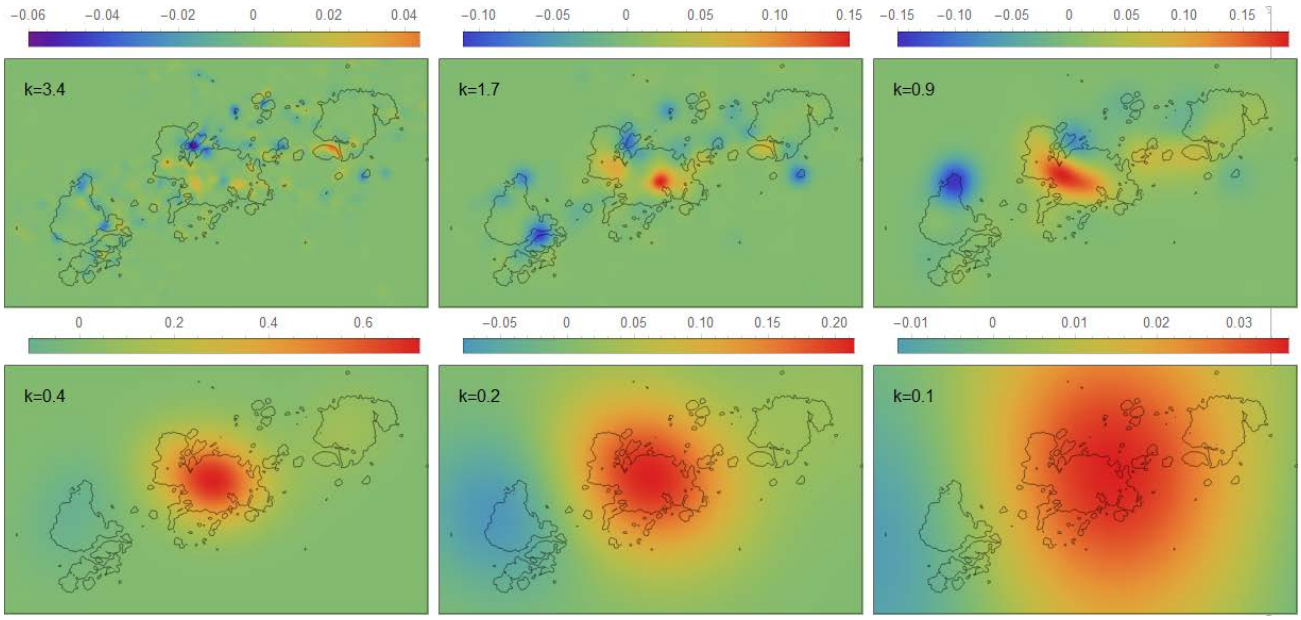
Properties of MHD turbulence can be assessed with

- high resolution observations
- advanced techniques for signal analysis.

We found that while the small-scales contain mainly random polarities of current helicity, being more affected by the observational biases, probably including the general 180-degree azimuth ambiguity for the transverse field component, the larger scales possess the main signed helical contribution in the entire solar active region. The intermediate scales much greater than the available resolution (order of magnitude from meso-granulation to super-granulation, some 10-30 Mm) contain the most physically interesting range of alternating helicity pattern, while some sunspots and plages contain current helicity of opposite polarities.

The work is supported by RSF grant 21-72-20067

Wavelet computation of current helicity of H_z (localization at different scales)
NOAA 11158 2011- Feb-13



ЭВОЛЮЦИЯ ФОТОСФЕРНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И СОЛНЕЧНЫХ ХРОМОСФЕРНЫХ СТРУКТУР

Андреева О.А.

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

Исследуя синоптические карты фотосферных магнитных полей и наблюдения хромосферы Солнца в линии He I 10830Å, полученные в Обсерватории Китт Пик, почти за три цикла солнечной активности, мы выявляем общие моменты и различия в динамике явлений, происходящих в двух слоях атмосферы Солнца. Интервал наблюдений январь 1977г. - сентябрь 2003г.

Анализ широтно-временных изменений магнитных полей в фотосфере и таких солнечных образований как активные области, корональные дыры и флоккулы, по наблюдениям их в верхней хромосфере Солнца показал: несмотря на то, что корональные дыры слабо проявляются в фотосферных магнитных полях, связь корональных дыр с ними существует - во время переполюсовки полярные корональные дыры отсутствуют или уменьшаются, тогда, как практически все остальное время они присутствуют. Для сильных полей ярко выражена цикличность как в фотосфере, так и в хромосфере. Солнечные образования в хромосфере охватывают более широкий широтный диапазон.

В результате сопоставления дифференциальности вращения фотосферных магнитных полей и солнечных образований в хромосфере, были выявлены следующие эволюционные характеристики: как вращение магнитных полей слабой и сильной напряженности, так и вращение хромосферных структур существенно различаются по набору значимых периодов вращения, по их широтному распределению и северо-южной асимметрии вращения. Для обоих слоев атмосферы Солнца характерно наличие одного и того же периода вращения для выбранного вида образования на разных широтах и разные периоды присутствуют на одной широте. Дифференциальность вращения для сильных магнитных полей в 3 и более раз превышает дифференциальность вращения хромосферных солнечных образований. Для слабых магнитных полей и корональных дыр разница в дифференциальности вращения менее выражена.

ОБ УГЛОВОМ РАССЕЯНИИ ИСТОЧНИКОВ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В НИЖНЕЙ КОРОНЕ СОЛНЦА

Мешалкина Н.С., Алтынцев А.Т.

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

Из наблюдений на VLA известно, что солнечном диске крайне редко наблюдаются в сантиметровом диапазоне источники с размерами менее нескольких угловых секунд. Статистический анализ наблюдений ССРТ точечных источников субсекундных импульсов на частоте 5.7 ГГц показал, что их видимые размеры меняются с положением на диске Солнца от 5” в центре до 50” вблизи лимба, то есть зависят от длины пути излучения в нижней короне[1,2]. В работах [3,4] показано, что величину углового уширения и ее зависимость от положения на диске можно объяснить рассеянием излучения на флуктуациях плотности плазмы короны с масштабами 1 – 100 км на высотах порядка 100 т.км. Эффективность рассеяния зависит от частоты распространяющейся волны. Как следствие, видимый размер точечного источника должен расти из-за рассеяния с уменьшением частоты квадратично.

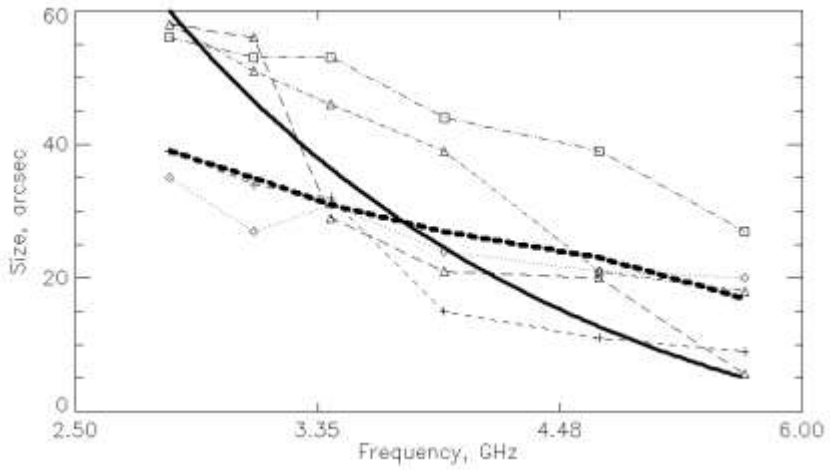


Рис.1. Зависимость размеров источников от частоты для пяти вспышек. Сплошная жирная кривая - зависимость $1/\nu^2$. Толстый пунктир – диаграмма СРГ для одной из вспышек.

Для изучения эффектов распространения излучения в нижней короне Солнца выбраны слабые вспышки, зарегистрированные в диапазоне частот 3-6 ГГц, в котором эффекты рассеяния существенны. Из 70 событий выбрано 5 вспышек, в которых на всех частотах наблюдался монотонный рост видимых с размеров с уменьшением частоты. Результаты измерений этих событий показаны на Рис.1. Измерения показывают, что инструмент позволяет исследовать эффекты рассеяния. В докладе обсуждаются спектральные и пространственные особенности исследуемых событий. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №22-22-00019.

1. Altyntsev et al. // ApJ 1996. V. **469**. P. 976.
2. Meshalkina et al. // Adv.Space Res. 2005. V. **35**. P. 185.
3. Bastian T. //ApJ 1994. V. **426**. P. 774.
4. Chashei et al. // Astronomy Reports 2006. V. **50**. P. 249.

СРАВНЕНИЕ ФУНКЦИЙ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТОВ HMI/SDO И SOT/HINODE

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

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

Вопрос изучения электрических токов в активных областях (АО) Солнца является важным в контексте понимания физики явлений солнечной активности, в том числе солнечных вспышек. Считается, что вспышки черпают энергию из свободной энергии магнитного поля, которая, в свою очередь, связана с электрическими токами.

На данный момент нам доступны векторные магнитограммы всего видимого диска Солнца (по данным инструмента HMI/SDO) или его отдельных участков (по данным инструмента SOT/Hinode). Из информации о трех компонентах вектора магнитного поля на одном уровне (в данном случае на фотосфере) возможно рассчитать вертикальную компоненту электрического тока на основе закона Ампера-Максвелла, j_z.

На основе данных с двух приборов, HMI/SDO и SOT/Hinode, были построены карты вертикальных электрических токов для нескольких АО в примерно одни и те же моменты времени (разница не более ~10 мин.). Похожее исследование проводилось в работе [1], однако в отличие от этой работы, мы сравниваем функции распределения $PDF(|j_z|)$ по данным HMI и SOT в каждой из рассматриваемых АО. Такие распределения уже использовались нами для статистического изучения вертикального тока в АО по данным HMI/SDO в работе [2]. Распределения для двух рассматриваемых инструментов оказались схожи по форме и, если провести отбор пикселов АО по величине магнитного поля $B \gtrsim 220\ G$, повторяют друг друга. Таким образом, несмотря на то, что прибор SOT/Hinode и имеет более высокое угловое разрешение, нет существенной разницы в том, данные какого прибора рассматривать при анализе функций распределения токов в областях сильного магнитного поля, какими как раз являются те участки АО, где локализованы вспышки.

Дополнительно мы приводим результаты исследования корреляции между индексом вспышечной активности и степенным индексом $PDF(|j_z|)$ для рассматриваемой выборки АО.

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

1. Fursyak Yu.A. // Geomagn. Aeron. 2018. V. **58.** P. 1129–1135.
2. Zimovets I.V., Nechaeva A.B., Sharykin I.N., Gan W.Q. // Astrofizika 2020. V. **63**. P. 463-477.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РАДИАЛЬНОГО ПОТОКА СКОРОСТИ ВЕЩЕСТВА И МАГНИТНОГО ПОТОКА В ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ СОЛНЦА

Садыков А.М.

Кафедра физики космоса, Физический факультет, МГУ, г. Москва, Россия,
sadykov.am19@physics.msu.ru

Всплывание магнитного потока является важной проблемой для понимания процессов, происходящих в конвективном слое и фотосфере Солнца. Для решения этой проблемы необходимо изучать динамику усиления магнитного поля и радиальной скорости вещества. По гипотезе о всплывании магнитного потока, оба явления должны быть взаимосвязаны.

Целью нашей работы является изучение взаимодействия магнитного потока и потока радиальной скорости вещества в зарождающихся активных областях. Для этого были рассмотрены данные глобальной сети телескопов GONG (Global Oscillations Network Group). В работе используются данные магнитограмм и допплерограмм, отобранных согласно следующем критериям: (1) в начальный момент времени на магнитограмме должна появится зарождающаяся активная область (АО); (2) начальное положение зарождающейся АО должно быть близко к восточному лимбу, не ближе чем 45 градусов от центрального меридиана; (3) АО должна развиться в четко выраженную конфигурацию АО с двумя или четырьмя пятнами. Для работы отобраны 9 АО (2011–2021 гг.), удовлетворяющие критериям. Для каждой АО данные рассматриваются с временным шагом в 4 часа на протяжении 6 дней, вплоть до сближения пятен с западным лимбом.

Анализ данных проходит в 2 этапа: распознавание области, занимаемой АО, и анализ этой области. Распознавание области АО происходит при помощи нахождения «центра тяжести» карты модуля измеряемого магнитного поля. Анализ области состоит в (1) выделении пятен и области вне пятна, (2) нахождении средней положительной (направленной по радиусу от центра Солнца) и отрицательной (направленной по радиусу в центр Солнца) скорости вещества вне пятна, (3) нахождении потока магнитного поля и потока положительной и отрицательной скорости в пятне, полученной вследствие вычета из данных средней скорости вне пятна. При этом пятном считается область с магнитным полем больше 15 Гаусс. Данные из выборки уравниваются по моменту времени, соответствующему резкому усилению магнитного потока, и находится среднее значение как магнитного потока, так и потоков поля скоростей. После рассматривается бинарное отношение магнитного потока и потока скоростей.

Предварительные результаты показывают, что существует статистически значимая корреляция между магнитным полем и положительным потоком скорости вещества. При этом корреляция для потока отрицательной скорости слабо выражена. Результаты подтверждают существование взаимосвязи магнитного потока и поля скоростей. Однако, полученный результат нельзя считать подтверждением гипотезы всплывания магнитного потока: по полученным данным нельзя однозначно ответить на вопрос, имеет ли место всплывание магнитного потока; для изучения этого вопроса требуется дальнейший анализ.

MEASUREMENT OF CORONAL MAGNETIC FIELD WITH MULTI-FREQUENCY MICROWAVE IMAGING

Fleishman G. D.

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

Solar radio emission is highly dependent on the magnetic field strength and direction in the corona. At the microwave range, the main radiation mechanisms contributing to the emission are the free-free and gyroresonant processes in case of non-flaring corona and the gyrosynchrotron process in case of flares. All these are sensitive to the magnetic field and can be used for the coronal magnetic field measurements. The key to accessing the inherent diagnostic power of radio emission is to have multi-frequency radio images of sufficient quality, resolution, and polarization purity, with which to confidently identify and separate the different emission mechanisms, to remove the ambiguities that have limited many past radio studies. In this talk I review the available measurements, measurement strategies that employ multi-frequency microwave imaging data, and conclude about the perspectives of the measurements with the existing and future radio interferometers.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ «ХОЛОДНЫХ» СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

А.Л. Лысенко, А.Т. Алтынцев, Н.С. Мешалкина, Г.Г. Моторина, Д.А. Жданов, S.M. White, Г.Д. Флейшман

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

Источником энергии солнечной вспышки является энергия магнитного поля, выделяемая в результате магнитного пересоединения. Эта энергия может расходоваться на нагрев окружающей плазмы, ускорение заряженных частиц, электронов и ионов, на кинетическую энергию коронального выброса массы и пр. Распределение энергии между различными компонентами меняется от вспышки к вспышке, и вопрос, чем оно обусловлено, на данный момент остаётся открытым [1], [2]. В частности, наблюдаются вспышки, для которых значительное нетепловое излучение ускоренных электронов сопровождается аномально слабым тепловым откликом [3], [4]. Такие вспышки, получившие название “холодных”, представляют особый интерес для изучения распределения энергии между компонентами вспышки и для исследования ускорения электронов.

Представленная работа продолжает статистическое исследование холодных вспышек, проведённое в [5]. В данной работе выявлено ~100 вспышек, отличающихся интенсивным микроволновым излучением на фоне относительно слабого излучения в мягком рентгеновском диапазоне. Анализ спектров гиросинхротронного излучения показал, что среди холодных вспышек встречаются события с очень различными свойствами: величиной магнитного поля, жёсткостью спектра ускоренных электронов, плотностью вспышечных петель и пр. Временная эволюция параметров микроволнового излучения также различается от вспышки к вспышке. Для части событий наблюдается эффект оптической толщины, для других событий, напротив, пиковая частота убывает с ростом интенсивности излучения. Для ряда событий спектральный индекс в оптически тонкой части спектра демонстрирует эволюцию мягкий-жёсткий-мягкий, что характерно для спектрального индекса в жёстком рентгеновском диапазоне. Для других событий оптически тонкий спектральный индекс изменяется от жёсткого к мягкому, а потом опять к жёсткому. Мы приводим интерпретации полученных результатов и обсуждаем возможные физические сценарии, приводящие к появлению холодных вспышек.

1. Emslie et al., // ApJ, 2012. V. 759, 1, id 71.
2. Motorina, et al., // Ge&Ae 2020, V. 60, 7, p. 929.
3. Masuda et al., // PASJ 2013, V. 65, id S1.
4. Fleishman et al., // ApJ 2016, V. 822, 2, id 71
5. Lysenko et al., // ApJ 2018, V. 856, 2, id 111.

ВЗАИМНОЕ РАСПОЛОЖЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЖГУТОВ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ И ИЗЛУЧЕНИЙ В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ ПЕРЕД БОЛЬШИМИ ВСПЫШКАМИ

Мельников В.Ф.[1], Соловьёв А.А.[1], Шаин А.В. [1], Бакунина И.А.[2]

[1] *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, v.melnikov@gaoran.ru*

[2]*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Нижний Новгород*

Проведено сравнение пространственной динамики микроволнового и ультрафиолетового (КУФ) излучений с пространственной динамикой магнитных жгутов и электрических токов на предвспышечной (NoRH, SDO/AIA, SDO/HMI) и вспышечной фазе (RHESSI, ALMA, SDO/AIA, SDO/HMI). Показано, что а) пространственная структура электрических токов в активных областях нестационарна; б) наиболее сильные токи наблюдаются в области, где КУФ петли перекрещиваются, а микроволновое и КУФ излучения наиболее нестационарны. Сравнение наблюдаемого пространственного распределения КУФ петель, жестких рентгеновских (ЖР) и микроволновых источников с восстановленными по фотосферному магнитному полю пространственному распределению электрических токов (магнитных жгутов) показывает, что в целом по области они коррелируют, но положение их пиков и динамика заметно отличаются. Вероятным ответом на это противоречие является то, что энерговыделение и ускорение частиц происходят, главным образом, на периферии жгутов. Тот факт, что пики ЖР и КУФ излучений локализуются в окрестностях пиков электрических токов (на оси магнитных жгутов), просто свидетельствует о том, что жгуты запасли достаточно много свободной энергии, часть которой может выделиться при благоприятных условиях. Процесс её выделения происходит на внешней оболочке жгутов, где развиваются МГД и кинетические неустойчивости.

Работа выполнена в рамках Государственного задания №1021032422589-5 и при частичной поддержке гранта РФФИ_Чехия № 20-52-26006.

БЕССИЛОВЫЕ МАГНИТНЫЕ ЖГУТЫ: СТРУКТУРА И ВСПЫШЕЧНОЕ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ

Соловьев А.А.

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

В магнитных жгутах, порождающих солнечную вспышку, напряженность магнитного поля заведомо выше 100Гс, чтобы обеспечить общую энергетику вспышки. Данное условие с необходимостью определяет бессиловую структуру магнитного поля внутри жгута, находящегося в солнечной хромосфере и/или короне:

$$[\nabla \times \mathbf{B}] = \alpha(\mathbf{r})\mathbf{B}, \quad (\nabla\alpha \cdot \mathbf{B}) = 0$$

Принята предложенная Паркером [1] модель осесимметричного магнитного жгута, в которой все его параметры зависят только от одной радиальной координаты r (в цилиндрической системе координат r, φ, z) и описываются с помощью одной «производящей» функции $F(r)$.

Численные расчеты показывают, что при понижении внешнего давления до определенного предела (что неизбежно происходит при выходе бессилового магнитного жгута в разреженные слои атмосферы) плотность тока $\boldsymbol{j}$ и бессиловой параметр α в жгуте претерпевают разрыв второго рода (от – до + бесконечности) на той поверхности, где эти функции меняют знак [2].

Возрастание плотности тока до значений, больших критического, ведет к возбуждению плазменной ионно-звуковой неустойчивости и появлению аномального сопротивления в слое толщиной около 15 км. Показано, что электрическое поле в области диссипации токов значительно превышает значение дрейсеровского поля E_{Dr}, при котором электрическая сила, ускоряющая заряды, сравнивается с силой трения, вызванной столкновениями электронов с ионами [3]. Электрическое поле много большее, чем E_{Dr}, отмечается и при регистрации гирорезонансного радиоизлучения солнечных вспышек в короне [4]. Важно, что такое поле может ускорить почти все частицы в области диссипации тока до сотен Мэв, что характерно для очень мощных солнечных вспышек.

Найденный новый эффект важен для понимания механизма вспышечного энерговыделения и нагрева как солнечной, так и звездных корон в целом.

Работа выполнена в рамках г/б тематики и при поддержке гранта Министерства науки и Высшего образования РФ № *075-15-2020-780*

1. Parker E.N. Cosmical magnetic fields. Their origin and their activity. Part I. Oxford. (1979)
2. Solov'ev A.A., Kirichek E.A. Force free magnetic flux ropes: inner structure and basic properties. MNRAS, 2021. V. **505.** P. 4406.
3. Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979.
4. Fleishman G.D. et al. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare. Science. 2020. V. **367.** P. 278.

ПЕРВЫЕ МНОГОВОЛНОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДВУХЛЕНТОЧНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ НА СИБИРСКОМ РАДИОГЕЛИОГРАФЕ

Кузнецов А.А., Алтынцев А.Т., Сыч Р.А., Жданов Д.А., Мешалкина Н.С., Каракотов Р.Р.

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

Мы представляем наблюдения солнечной вспышки класса M1.6, произошедшей 9 октября 2021 г. в активной области AR 12882. Данная вспышка была первой двухленточной вспышкой, зарегистрированной Сибирским Радиогелиографом (СРГ), что позволило получить микроволновые изображения с высоким временным разрешением на шести частотах в диапазоне 3-6 ГГц. Данное событие также наблюдалось микроволновыми спектрополяриметрами ИСЗФ СО РАН (в диапазоне 2-24 ГГц), инструментом Konus-Wind (в рентгеновском диапазоне), SDO (в оптическом, УФ и КУФ диапазонах) и др.

Вспышка 9 октября 2021 г. включала пять импульсов ускорения частиц, проявлявшихся одновременно в микроволновом и рентгеновском диапазонах. Источники излучения в микроволновом и КУФ диапазонах пространственно совпадали. На начальном этапе вспышки (первые три импульса ускорения), микроволновые и КУФ источники совпадали со вспышечными лентами. На более поздней фазе вспышки (последние два импульса ускорения) микроволновые и КУФ источники располагались между вспышечными лентами, вблизи нейтральной линии магнитного поля. Подобная эволюция, по-видимому, отражала процесс заполнения вспышечных петель ускоренными электронами, что подтверждается смягчением микроволнового спектра со временем. Также, на заключительном этапе вспышки наблюдалось движение микроволновых и КУФ источников вдоль нейтральной линии со скоростью 20-40 км/с; со временем, скорость движения источников уменьшалась, а расстояние между вспышечными лентами возрастало. Скорее всего, данное движение отражало распространение процесса магнитного пересоединения вдоль вспышечной аркады.

Спектр микроволнового излучения в рассматриваемом событии, в основном, соответствовал гиросинхротронному механизму излучения. На фоне широкополосного вспышечного излучения также наблюдался короткий (около 20 с) узкополосный (с мгновенной шириной около 1 ГГц) микроволновый всплеск в диапазоне 2-6 ГГц, с нерегулярным частотным дрейфом; скорее всего, он был обусловлен плазменным излучением. На микроволновых изображениях, данный всплеск соответствовал появлению дополнительного источника с обратным (по сравнению с фоном) знаком поляризации.

Мы считаем, что эволюция наблюдаемого излучения (в различных спектральных диапазонах) во вспышке 9 октября 2021 г. отражала динамику магнитного пересоединения. Данное событие также сопровождалось подъёмом токового жгута, что привело к формированию коронального выброса массы и всплесков II типа.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда, проект № 21-12-00195. Авторы благодарят Лесового С.В. и команду СРГ за предоставленные данные наблюдений.

ДВЕ СТАДИИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЕ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ X5.4 КЛАССА 25 ФЕВРАЛЯ 2014 Г.

Шарыкин И.Н., Зимовец И.В.

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

Работа посвящена исследованию динамики фотосферных источников излучения, источников рентгеновского излучения и магнитного поля во время мощной эруптивной солнечной вспышки рентгеновского класса X5.4, произошедшей 25 февраля 2014 г. Данная вспышка была выбранна для анализа в силу наличия признаков двух стадий энерговыделения в импульсной фазе. Кроме этого вспышка характеризуется наличием большого кол-ва качественных наблюдений, удачного месторасположения на диске Солнца и ориентации вспышечных петель относительно луча зрения. По фотосферному излучению и магнитному полю используются данные наблюдений HMI/SDO. Данные RHESSI используются для анализа рентгеновского излучения.

Анализ наблюдательных даных показал наличие двух последовательных морфологически различающихся фаз энерговыделения в импульсной фазе вспышки. Первая фаза характеризовалась наиболее сильным скачком фотосферного магнитного поля, движением источников жесткого рентгеновского и фотосферного излучения по типу zipping и их наиболее компактными размерами. Во второй фазе наблюдается сильный подъем корональных источника мягкого теплового рентгеновского излучения, появление радиовсплесков II и III типа, стабилизация движения фотосферных источников излучения вдоль нейтральной линии и их расхождение от нее. При этом изменение фотосферного магнитного поля гораздо менее выражено по сравнению с первой фазой, а размеры как фотосферных, так и корональных источников излучения больше. Мы считаем, что данные наблюдения явно показывают проявления двух типов магнитного пересоединения, развивавшегося в различающихся геометриях магнитного поля. Во время первой фазы происходило трехмерное магнитное пересоединение в результате взаимодействия низколежащих магнитных петель с большим широм вблизи нейтральной линии по типу tether-cutting. Вторая фаза связана с формированием «классического» высокого квазивертикального токового слоя под эруптивным волокном в рамках стандарной модели эруптивной солнечной вспышки.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 20-72-10158 «Прекурсоры и первоначальное энерговыделение солнечных вспышек».

ДИНАМИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ И ЖЁСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАЛИМБОВОЙ ВСПЫШКЕ 13 МАЯ 2013

Овчинникова Е.П., Чариков Ю.Е, Шабалин А.Н.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, elfimovaevgeniya@gmail.com

Проведен анализ рентгеновского излучения вспышки X1.7 класса (GOES) в активной области 11748, SOL2013-05-13T02:12, зарегистрированной спектрометром RHESSI. Привлекательность данного события определяется залимбовым положением на диске Солнца, поэтому удается однозначно определить местоположение коронального источника жесткого рентгеновского излучения в вершине петли. В динамике нарастания рентгеновского потока на энергиях 25-50 кэВ можно выделить несколько стадий по виду наблюдаемого спектра и мощности потока: фаза роста до главного пика в интервале 01:56:24 — 02:08:16, пик и спад 02:08:24 — 02:30:00. На фазе роста до главного пика энергетический спектр простирается до 50 кэВ, и может быть описан моделью теплового тормозного излучения двухтемпературной плазмы (хи-квадрат <=1). Две компоненты плазмы с различной температурой в рассматриваемой вспышке могут представлять собой излучение части отдельных петель вспышечной аркады. Температура одной компоненты достигает на пике T_1 = 87 МК, мера эмиссии $EM_1 = 10^{46}$ $см^{-3}$, для второй компоненты T_2 = 31 МК, мера эмиссии $EM_2 = 2x10^{47}$ $см^{-3}$. Изменения рентгеновского потока на фазе роста совпадает с характером роста и спада обеих температур. Мера эмиссии непрерывно растет для менее горячей компоненты, для более горячей испытывает рост и спад. После главного пика энергетический спектр аппроксимируется суммой двухтемпературной тепловой составляющей и степенной зависимостью с показателем 3. Температура и мера эмиссии плавно спадают. Источник мягкого рентгеновского 6—20 кэВ излучения на фазе роста и первого пика не меняет своего положения, затем его высота растет со средней скоростью 7 км/с, расстояние источника до центра диска Солнца увеличивается на 15 арксекунд за 25 минут.

На фазе роста потока для коронального источника 6—20 кэВ рассчитана временная корреляция размера (площади) источника и рентгеновского потока. Коэффициент корреляции для вспышки 13-05-2013 составил k = -0.8. Отсутствие увеличения высоты коронального источника над лимбом в начале вспышки, отрицательная корреляция размера источника и потока во вспышке, высокая яркость коронального источника на ранней стадии вспышки, когда времени для увеличения концентрации плазмы за счет испарения хромосферной плазмы не достаточно, косвенно свидетельствует в пользу модели коллапсирующих ловушек (Veronig et al., 2006; Somov & Kosugi, 1997).

1. Veronig, A. M. et al. // Astron. Astrophys. 2006 V.**446**. P.675.
2. Somov, B. V. & Kosugi, T. // Astrophys. J. 1997. V.**485**. P.859

РАЗВИТИЕ ЭРУПТИВНОЙ ВСПЫШКИ M2.5 7 ИЮНЯ 2011 ПО РАДИО (RSTN) И РЕНТГЕНОВСКИМ (GOES) НАБЛЮДЕНИЯМ

Григорьева И.Ю.[1], Струмиский А.Б.[2]

[1]*ГАОРАН, г. Санкт-Петербург, Россия iruna.2014.irina@mail.ru*

[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Вспышка M2.5 7 июня 2011 года и связанные с ней явления представляют собой наиболее изученное событие 24 цикла солнечной активности благодаря наблюдениям космических аппаратов GOES, RHESSI, FermiGRO, SOHO, SDO и STEREO-A(B). В работе сделаны простые физические оценки динамики этой вспышки, основанные на наблюдениях радио (Radio Solar Telescope Network, RSTN) и мягкого рентгеновского (SXR) излучений, которая связана с корональным выбросом массы (КВМ). Мы обращаем внимание на возможное изменение высотного профиля концентрации плазмы в эруптивной вспышке, которое не учитывалось другими авторами.

Мы считаем, что из последовательной регистрации излучения на частотах 1415, 610, 410 и 245 МГц известна зависимость от времени концентрации плазмы $n_0(t)$, заполняющей область $V_0 = 2\pi {L_0}^3/3 \approx 2{L_0}^3$, где $L_0(t)$ – ее характерный размер. В этой области может находиться SXR источник с концентрацией $n(t)$, где $n(t) > n_0(t)$ и характерным размером $L(t) < L_0(t)$. Из SXR наблюдений вычисляется температура $T(t)$ и мера эмиссии $EM(t)$ вспышечного источника. Предполагая, что источник SXR излучения – полусфера с объемом $V = 2\pi L^3/3 \approx 2L^3$, т.е. $EM(t) = 2n(t)^2 L(t)^3 > 2n_0(t)^2 L_0(t)^3$ и $L(t) < \sqrt[3]{EM(t)/2n_0(t)^2}$), можно оценить L(t) – минимальный и $L_0(t)$ – максимальный размер SXR источника (при условии $T(t) = T_0(t)$). При расширении замагниченной плазмы SXR источника (увеличение его объема) в поле B должно выполняться условие $B^2/8\pi > 2n_0 kT$. При переходе всей энергии магнитного поля в кинетическую энергию плазмы с концентрацией n, максимальная возможная скорость КВМ будет равна локальной скорости Альвена – $V_A = B/\sqrt{4\pi m_p n_0}$.

Первичное энерговыделение в событии 7 июня 2011 года произошло на (-4) мин, относительно начала излучения на 15,4 ГГц, и возник расширяющийся SXR источник. В результате к моменту 0 мин скорость Альвена достигла ~1500 км/с на корональных высотах 75-156 Мм и поддерживалась таковой в течение ~4 мин, обеспечивая равномерное ускорение КВМ до ~1500 км/с.

Работа поддержана субсидиями по темам «Многоволновое активное Солнце» (ИЮГ) и «Плазма» (АБС).

МНОГОВОЛНОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ СОЛНЦА СИБИРСКИМ РАДИОГЕЛИОГРАФОМ В ДИАПАЗОНАХ 3-6 ГГЦ и 6-12 ГГЦ

Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Анфиногентов С.А., Глоба М.В., Губин А.В., Кашапова Л.К., Кузнецов А.А., Мешалкина Н.С., Сыч Р.А.

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

Сибирский Радиогелиограф (СРГ) — создаваемый в настоящее время радиоинтерферометр с тремя Т-образными антенными решетками, предназначенный для наблюдений диска Солнца в микроволновом диапазоне с высоким временным и пространственным разрешением с полной полосой принимаемых частот 3 — 24 ГГц [1]. В докладе обсуждаются результаты тестовых наблюдений СРГ на антенных решетках 3 – 6 ГГц (18 марта – 21 октября) и 6 – 12 ГГц (12 декабря – н.вр.). Демонстрируются примеры наблюдений солнечных вспышек в широких пределах по мощности: от микровспышек рентгеновского класса А до геоэффективных двухленточных вспышек М класса. В некоторых слабых вспышках размеры микроволновых источников меньше диаграммы СРГ и не превышают нескольких угловых секунд. Обнаружены события, в которых размеры источников растут с уменьшением частоты излучения квадратично, что можно объяснить рассеянием излучения на флуктуациях плотности в нижней короне. В некоторых событиях выявлены новые спектральные структуры: на фоне широкополосного гиросинхротронного излучения наблюдаются узкополосные (с мгновенной шириной около 1 ГГц) микроволновые всплески с с аномально медленным частотным дрейфом, которым соответствует появление во вспышечной области нового поляризованного источника. Представлены первые результаты спектральных и поляризационных измерений микроволнового излучения магнитных структур спокойного Солнца. Анализируются причины вариаций индекса 10.7 на протяжении оборота Солнца с помощью последовательности ежедневных изображений диска Солнца на частоте 2.8 ГГц. Пространственное разрешение СРГ на обеих решетках достаточно для регистрации колебаний интенсивности и поляризации микроволнового излучения с периодами несколько минут в пятенных активных областях. Измерения на разных частотах показывают, что относительные интенсивности колебаний с разными периодами зависят от частоты регистрации.

В целом, результаты тестовых наблюдений показывают, что технические характеристики двух решеток соответствуют техническому заданию СРГ.

1. Алтынцев А.Т., Лесовой С.В., Глоба М.В., Губин А.В., Кочанов А.А., Гречнев В.В., Иванов Е.Ф., Кобец В.С., Мешалкина Н.С., Муратов А.А., Просовецкий Д.В., Мышьяков И.И., Уралов А.М., Федотова А.Ю. Многоволновый Сибирский радиогелиограф // Солнечно - земная физика. 2020. Т.6, №2. С. 37-50.

СПЕКТРОРАДИОМЕТРИЯ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ НА КРУПНЫХ ИНСТРУМЕНТАХ

Bogod V.M., Лебедев М.К., Овчинникова Н.В., Рипак А.М., Стороженко А.А.

САО РАН (СПБФ) г. Санкт-Петербург, Россия, vbog_spb@mail.ru

Современные исследования радиоизлучения Солнца осложняются непрерывным усилением мощности и многочастотностью внешних помех, которые часто полностью перекрывают важные диапазоны частот. Многие актуальные задачи в солнечной радиоастрономии нуждаются в больших эффективных площадях радиотелескопов, высоких разрешениях по частоте, по времени, точных пространственных измерениях и большом динамическом диапазоне. Становится актуальным смена концепции приемной регистрирующей аппаратуры. В докладе рассматриваются актуальные задачи физики солнечной короны в сочетании с оптимальными методами наблюдений на крупных инструментах. Рассмотрены особенности и трудности сочетания высоких параметров: динамического, пространственного, временного, частотного разрешений. Предложенные решения наблюдательного комплекса нового поколения реализуют возможности интеллектуального выбора условий регистрации в многооктавном режиме с многоканальностью более 8000 каналов/ГГц с временным разрешением до 8 млсек/ спектр. Становится доступным мультиобъектный режим наблюдений от мощных вспыхивающих объектов до слабых структур вплоть до флуктуаций реликтового фона.

Высокоскоростная обработка данных позволяет реализовать on-line режим устранения помех, который основан на быстром статистическом анализе спектра с выделением негауссовых (помеховых) структур. Предложены методы скоростного анализа данных большого объема и их представления пользователям. Приведены примеры работы комплекса в диапазоне 1-3 ГГц.

Рассматриваются перспективы нового подхода для мультиобъектных радиоастрономических наблюдений при реализации режима слежения на РАТАН-600: от рекомбинационных линий до широкодиапазонных спектров, от слабоконтрастных флуктуаций до быстрых изменений во вспышках и др.

Результат получен в рамках госзадания САО РАН на период 2021-2023гг. (тема №121101300033-9).

ГЕНЕРАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВСТРЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ ПРИ НАЛИЧИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ КОСЫХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ

Анненков В.В., Волчок Е.П., Тимофеев И.В.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия
НГУ, физический факультет, г. Новосибирск, Россия
v.v.annenkov@inp.nsk.su

Возникновение встречных потоков электронов возможно в ходе различных процессов вызванных активностью Солнца, а их взаимодействие приводит к образованию всплесков в радиодиапазоне. Так, захват в магнитные петли электронов, ответственных за радиоизлучение III типа, генерирует излучение V типа [1]. Кроме того встречные популяции ускоренных электронов могут возникать при взаимодействии искривлённой ударной волны с межпланетным магнитным полем [2] и участвовать в образовании радиовсплесков II типа.

Ранее нами было обнаружено [3], что высокоэффективная (проценты от мощности пучков) генерация излучения на второй гармонике плазменной частоты возможна в том случае, когда в трёхволновом процессе слияния в электромагнитную волну участвуют наиболее неустойчивые возбуждаемые пучками моды плазменных колебаний. Однако этот процесс оказался очень чувствителен к точности локализации максимума инкремента. В данной работе показано, что высокая эффективность генерации излучения в такой системе возможна и при развитии мелкомасштабной косой неустойчивости, без необходимости выполнения строгих условий для трёхволнового процесса. Механизм генерации в данном случае обусловлен взаимодействием плазменных колебаний с различным поперечным профилем [4]. Данный процесс может быть актуален для интерпретации радиовсплесков, возникающих в присутствии встречных релятивистских электронных пучков в относительно слабом магнитном поле, допускающем возбуждение косых пучково-плазменных неустойчивостей.

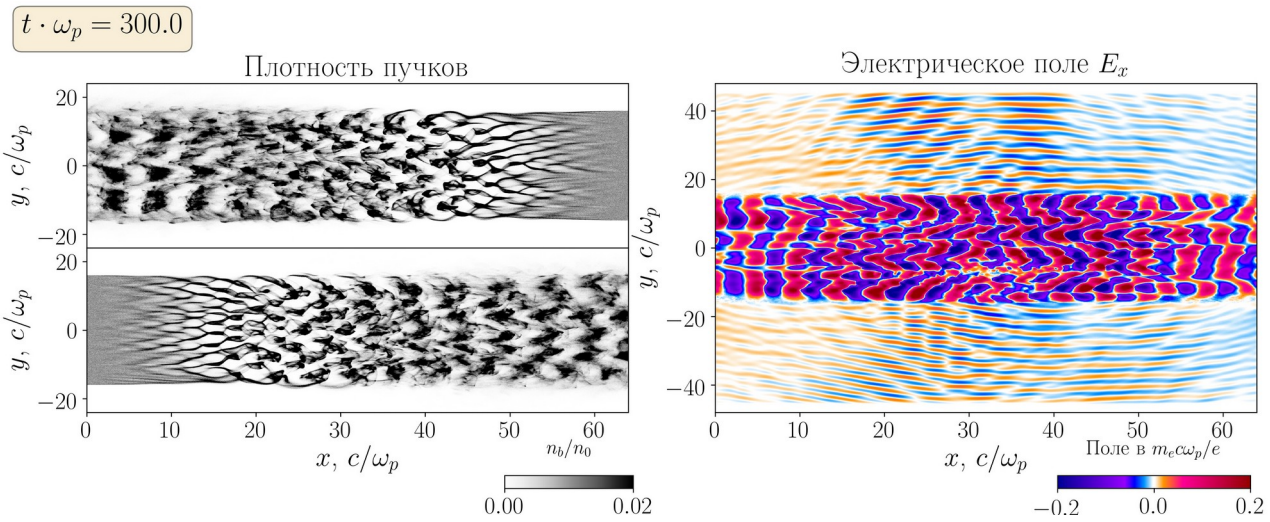


Рис. 1 Моделирование методом частиц в ячейках. Слева: профили плотности встречных электронных пучков с направленной скоростью vb=0.9c. Справа: продольное электрическое поле E_x.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2676.2021.1.2.

1. Zheleznyakov, V. V. & Zaitsev, V. V. // Soviet Astronomy 1968 V. **12**, P. 14.
2. Ganse, U. et al. // Solar Physics 2012 V. **280**, P. 551–560.
3. Annenkov, V. V., Volchok, E. P. & Timofeev, I. V. // Astrophys. J. 2020 V. **904**, P. 88.
4. Annenkov, V. V. et al. // Phys. Plasmas 2018 V. **25**, P. 113110.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СУБТЕРАГЕРЦОВОГО ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

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

Astronomical Institute of the CAS, Ondřejov, 251 65 Czech Republic;

Pulkovo Observatory, St.Petersburg, Russia, motorinagalina@gmail.com

На основе численного моделирования с помощью кода FLARIX рассмотрена природа увеличения потока вспышечного субтерагерцового (суб-ТГц) радиоизлучения с частотой в диапазоне 100-400 ГГц. Исходя из уравнений радиационной гидродинамики, исследована динамика вспышечной плазмы на разных высотах - от фотосферы до солнечной короны. Изучена эволюция плотности и температуры плазмы вспышечной петли, вызванной взаимодействием короткого треугольного импульса потока ускоренных в короне электронов с нижними слоями атмосферы. Рассчитаны временные профили спектральных потоков теплового тормозного излучения в суб-ТГц диапазоне. Произведено сравнение с результатами моделирования, полученными с помощью численного кода RADYN. Обсуждаются следствия полученных результатов.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ и Чешского научного фонда в рамках научного проекта N20-52-26006, Минобрнауки (НИР №0831-2019-0006) и RVO:67985815, 21-16508J of the Grant Agency of the Czech Republic.

НАБЛЮДЕНИЯ КРУГОВОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ СУБ-ТЕРАГЕРЦОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК НА ЧАСТОТЕ 93 ГГЦ

Смирнова В.В., Рыжов В.С., Цап Ю.Т.

КрАО РАН, пгт. Научный, Россия, vvsvid.smirnova@yandex.ru

Наблюдения круговой поляризации радиоизлучения солнечных вспышек представляет большой интерес, так как позволяют проводить более глубокий анализ энергетики вспышечного процесса, включая диагностику величины и направления магнитного поля в источнике. Большая часть исследований круговой поляризации во вспышках сосредоточено на микроволновом диапазоне, тогда как суб-терагерцовый (0.3-3 мм) диапазон остается малоизученным.

В представленной работе проведен анализ новых наблюдений интенсивности и круговой поляризации солнечных вспышек, которые наблюдались на частоте 93 ГГц, на радиотелескопе РТ-7,5 МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2021 г. Особое внимание уделено вспышке М 1.6, произошедшей 9.10.2021 г. в активной области NOAA 12882. Исследована эволюция степени круговой поляризации в максимуме и на спаде вспышки. На основе сравнения результатов суб-ТГц наблюдений с данными в других диапазонах приводится интерпретация полученных результатов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006), РФФИ и Чешского научного фонда в рамках научного проекта № 20-52-26006.

НАБЛЮДЕНИЕ НАГРЕВА ТОКОВОГО СЛОЯ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ

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

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

В солнечной короне, магнитное пересоединение происходит из-за сопротивления плазмы. В то же время, сопротивление вызывает омический нагрев. Поэтому во время пересоединения токовый слой должен греть окружающую плазму. В данной работе мы обнаружили экспериментальные свидетельства такого нагрева. Эффект наблюдался во время солнечной вспышки, произошедшей 16 февраля 2003 года в активной области NOAA 10278 рядом с солнечным лимбом. Благодаря подобному расположению, нам удалось идентифицировать основные элементы вспышки: вспышечную аркаду, магнитный жгут, и предполагаемое местоположение токового слоя. Проанализировав изображения, полученные в линии Mg XII 8.42 A комплексом КОРОНАС-Ф/СПИРИТ, мы обнаружили высокотемпературное излучение в предполагаемом месте токового слоя. Высокотемпературное излучение появилось во время импульсной фазы ускорения коронального выброса массы. Мы считает что это дополнительно подтверждает, что нагрев плазмы вокруг токового слоя и пересоединение магнитного поля внутри слоя связаны друг с другом.

Исследование выполнено за счет средств Российского научного фонда (проект № 21-72-10157).

ТЕПЛОВОЙ МЕХАНИЗМ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОБЛАСТЕЙ БЫСТРОГО ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ

Леденцов Л.С.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, leonid.ledentsov@gmail.com

Рассмотрено влияние джоулева и вязкого нагрева, теплопроводности и радиационного охлаждения на структурную устойчивость предвспышечного токового слоя. Решена задача о малых возмущениях в кусочно-однородной МГД-модели токового слоя. Решение допускает образование неустойчивости теплового характера. Модель позволяет получить точные аналитические выражения для инкремента и пространственного масштаба неустойчивости, а также их простые приближения в условиях солнечной короны. В линейной фазе время нарастания неустойчивости пропорционально характерному времени радиационного охлаждения плазмы и зависит от логарифмических производных функции радиационного охлаждения по параметрам плазмы. Неустойчивость приводит к поперечной фрагментации токового слоя с пространственным периодом 1-10 Мм в широком диапазоне параметров корональной плазмы. Показано, что наличие слабого продольного поля не меняет пространственный период тепловой неустойчивости в наиболее ожидаемом диапазоне параметров предвспышечного токового слоя и, кроме того, способствует формированию неустойчивости. С другой стороны, сильное продольное магнитное поле ведет к пространственной стабилизации токового слоя. Кроме того показано, что фрагментация поперек тока является естественной особенностью модели. Наклон фрагментации не превышает нескольких градусов для реалистичных предвспышечных параметров корональной плазмы. Как следствие, наклонная фрагментация не оказывает сильного влияния на результаты моделирования, однако экстремальные изменения могут достигать порядка величины. Таким образом, наклонная фрагментация может привести к уменьшению оценки пространственного периода элементарного энерговыделения в солнечных вспышках до 0.1-1 Мм. Рассмотренная неустойчивость может быть ответственна за запуск первичного энерговыделения в солнечных вспышках.

Leonid Ledentsov, Thermal trigger for solar flares I: Fragmentation of the preflare current layer // *Solar Physics*. — 2021. — Vol. 296. — P. 74.

- **DOI:** 10.1007/s11207-021-01817-1

Leonid Ledentsov., Thermal trigger for solar flares II: Effect of the guide magnetic field // *Solar Physics*. — 2021. — Vol. 296. — P. 93.

- **DOI:** 10.1007/s11207-021-01840-2

Leonid Ledentsov, Thermal trigger for solar flares III: Effect of the oblique layer fragmentation // *Solar Physics*. — 2021. — Vol. 296. — P. 117.

- **DOI:** 10.1007/s11207-021-01862-w

О фотосферном источнике энергии вспышек в белом свете

А.В. Степанов, В.В. Зайцев

Исследован дополнительный нагрев фотосферы и нижней хромосферы до температур порядка 10^4 *K*, при которых происходит генерация вспышечного континуума (белых вспышек). Дополнительный нагрев связан с диссипацией кольцевых электрических токов, возникающих в полутени солнечных пятен или в основаниях магнитных петель при импульсном возрастании скорости фотосферной конвекции. Получен критерий дополнительного нагрева, зависящий от скорости фотосферной плазмы и вертикальной компоненты магнитного поля. Для области полутени при вертикальной компоненте магнитного поля $B_z = 10^2\mathrm{G}$, нагрев возможен при скорости фотосферной конвекции $V_\mathrm{r} \geq 10^5 \mathrm{cm}\, s^{-1}$, что превышает типичную скорость конвекции $\approx 3 \times 10^4 \mathrm{cm}\, s^{-1}$. Увеличение скорости фотосферной плазмы и возрастание излучения в континууме может быть связано с увеличением градиента магнитного поля вблизи нейтральной линии при сближении магнитных областей с противоположной полярностью вертикальной компоненты магнитного поля. В случае оснований магнитных петель увеличение скорости может инициироваться развитием неустойчивости Релея-Тэйлора. Для белой вспышки 24 апреля 1981 года, для которой известны значения температуры, электронной концентрации, концентрации нейтральных атомов водорода и наблюдаемой светимости, оценена излучательная способность в ядре вспышки и определена толщина вспышечного слоя на луче зрения.

ОБ УСКОРЕНИИ НЕТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ТУРБУЛЕНТНОСТИ ВИСТЛЕРОВ ВО ВСПЫШЕЧНОЙ ПЕТЛЕ

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*

Известно, что вистлеры (свисты) могут играть важную роль в кинетике нетепловых электронов во вспышечных петлях. Это относится как к процессам рассеяния электронов по питч-углам, так и к процессам их стохастического ускорения. В работе (Filatov & Melnikov, Ge&Ae 2020, V.60, P.1137) мы рассмотрели самосогласованную задачу о резонансном взаимодействии энергичных электронов с турбулентностью вистлеров и на ее основе исследовали динамику питч-углового рассеяния электронов и генерацию (затухание) самой турбулентности в петле. Вопрос об ускорении нетепловых электронов остался неисследованным.

В настоящей работе рассматривается процесс стохастического ускорения инжектированных нетепловых электронов при их взаимодействии с турбулентностью вистлеров. Процесс ускорения рассматривается в диффузионном приближении, путем введения соответствующего диффузионного члена в исследуемое кинетическое уравнение Фоккера-Планка. В рамках одномерной модели симметричной, неоднородной и адиабатической магнитной ловушки, с заданными инжекцией нетепловых электронов и турбулентностью вистлеров, исследуется распределение электронов в петле по энергии и питч-углу на фазах роста и спада мощности инжекции. Построены профили распределения электронов по энергии и питч-углам, показывающие возможность эффективного ускорения при достаточно большой плотности энергии турбулентности, когда альтернативный процесс высыпания электронов в конус потерь оказывается незначительным (электроны «заперты» в турбулентной ловушке). Рассмотрено влияние на ускорение электронов интенсивности инжекции и пробочного отношения в магнитной ловушке петли.

Работа выполнена в рамках Государственного задания №1021032422589-5 и при частичной поддержке гранта РФФИ_Чехия № 20-52-26006.

БЕТАТРОННОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ И КУЛОНОВСКИЕ СТОЛКНОВЕНИЯ

Цап Ю.Т., Мельников В.Ф.

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

На основе дрейфового приближения проведен анализ бетатронного ускорения электронов в условиях солнечных вспышек с учетом кулоновских столкновений. Исходя из модели коллапсирующей магнитной ловушки показано, что вследствие кулоновских потерь пороговое значение энергии инжектируемых в корональную арку электронов должно превышать десятки-сотни кэВ. Этот вывод хорошо согласуется с результатами численных расчетов, следующих из решения уравнения Фоккера-Планка [1]. Обращено внимание на важность механизмов ускорения электронов в окрестности особых точек (МГД разрывов), а также в результате разделения электрических зарядов. Обсуждаются возможные модели генерации крупномасштабных электрических полей, включая конвективную компоненту, в атмосфере Солнца.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и гранта РФФИ_Чехия в рамках научного проекта № 20-52-26006.

1. Filatov L.V., Melnikov V.F., Gorbikov S.P., 2013. Geomag. Aeronom., vol. **53**, pp. 1007–1012.

УСКОРЕНИЕ И РЕНТГЕНОВСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В МОДЕЛИ КОЛЛАПСИРУЮЩИХ ЛОВУШЕК

Шабалин А.Н., Чариков Ю.Е.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия, shabalin.fti@yandex.ru

В работе рассматриваются вспышечные события, в которых на начальной стадии роста потока излучения наблюдается яркий корональный источник в жестком рентгеновском (ЖР) диапазоне на энергиях более 20 кэВ. Рассматривается увеличение концентрации плазмы в вершине за счет сжатия петли в процессе релаксации магнитного поля петли (модель коллапсирующей ловушки). В отличие от эффекта испарения хромосферной плазмы, при котором существенное увеличение концентрации плазмы в вершине (эффект Ньюперта) происходит за времена порядка минуты и более, в модели коллапсирующей ловушки подобный рост концентрации плазмы может происходить быстрее - за секунды - десятки секунд. В работе проведен расчет яркости жесткого рентгеновского источника в вершине петли на ранней стадии роста потока в модели коллапсирующих ловушек, а также рассчитан дополнительный рост энергии ускоренных электронов за счет механизмов бетатронного и Ферми ускорения, сопутствующих “коллапсу” магнитной ловушки. Показано, что при характерных временах коллапса 10—30 с общая энергия ускоренных электронов по отношению к энергии в момент инжекции увеличивается на 30—250% в результате бетатронного и Ферми ускорения, то есть энергии изменяющегося магнитного поля. Доля потока ЖР излучения из вершины петли в диапазоне энергии 29—58 кэВ по отношению к интегральному потоку оказывается выше на 15—30% в модели с коллапсирующими ловушками и достигает значений 75—85%. Также показано, что увеличение энергии ускоренных электронов преимущественно обеспечивается бетатронным механизмом ускорения, который приводит к росту поперечной составляющей импульса электронов. Подобная трансформация энергетического спектра ускоренных электронов не оказывает существенного влияния на долю ЖР излучения из вершины петли. Показано, что в случае анизотропной инжекции электронов дефицит квази-поперечно распределенных электронов в магнитной петле приводит к неэффективности процессов дополнительного ускорения в модели коллапсирующих ловушек с заданной геометрией магнитного поля и его изменения во времени. Таким образом, в работе показано, что модель коллапсирующих ловушек способна объяснить появление ярких корональных источников ЖР излучения в первые секунды - десятки секунд после начала роста ЖР потока во время солнечной вспышки.

Работа поддержана грантом РНФ № 20-72-10158

ПОЛЯРИЗАЦИЯ ЖЕСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Чариков Ю.Е., Шабалин А.Н.

ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, г.Санкт-Петербург, Россия, Yuri.Charikov@mail.ioffe.ru

Тормозное рентгеновское излучение, по сути, является поляризованным. Однако, величина степени поляризации зависит от параметров пучка электронов, концентрации плазмы и угла наблюдения. При расчетах степени поляризации жесткого рентгеновского (ЖР) излучения необходимо использовать релятивистское сечение тормозного излучения и кинетическую функцию распределения быстрых электронов. Задача расчета становится многопараметрической и требует проведения серии модельных расчетов. В докладе рассмотрены модели с инжекцией изотропных по питч-углу ускоренных электронов, с различной концентрацией плазмы в вершине магнитной петли, соотношением величины магнитной индукции в основании и вершине $B_{max}/B_0 = 2$ и 7 и показателем энергетического спектра ускоренных электронов $\delta = 3, 5, 7$ для угла наблюдения 90^0. Из расчетов следует, что все изотропные модели в симметричных магнитных петлях вне зависимости от отношения B_{max}/B_0 и показателя δ дают высокую степень поляризации в вершине до +25% в диапазоне энергий 29—58 кэВ и до +16% в диапазоне энергий 75—134 кэВ, что свидетельствует о квазипоперечном характере распределения захваченных в вершине ускоренных электронов. Повышение концентрации плазмы в вершине петли на порядок, до значений $(5—8)x10^{10}$ $см^{-3}$ уменьшает степень поляризации примерно на 10% в результате более эффективного кулоновского рассеяния электронов, приводящего к изотропизации. Этот же процесс приводит к уменьшению степени поляризации ЖР – излучения в основаниях до значений менее 5%. Для анизотропных распределений с питч-угловым распределением типа $S(\alpha) = \cos^{12}(\alpha)$ степень поляризации достигает отрицательных значений — 35% в вершине петли и уменьшается практически до 0 в подножиях петли. Как и в изотропном случае, с возрастанием концентрации плазмы в короне степень поляризации в вершине уменьшается с – (30—35)% до – (16—23%) в диапазоне энергий 29—58 кэВ, и с - 23% до - 17% в диапазоне 75—135 кэВ. Спектр электронов, величина B_{max}/B_0 не оказывают существенного влияния на степень поляризации. Однако, при увеличении B_{max}/B_0 область с отрицательной поляризацией существенно сужается. Различие знаков степени поляризации ЖР – излучения во время вспышек в вершине свидетельствует о различном питч-угловом распределении электронов (поперечное - продольное). Измерения поляризации ЖР излучения из вершины поляриметрами без пространственного разрешения возможны только для залимбовых вспышек, что делает их привлекательным объектом будущих наблюдений. Подобно кулоновскому рассеянию (высокой концентрации плазмы), магнитные флуктуации и турбулентность (ионно-звуковая, ленгмюровская), локализованные в корональной части петли, уменьшают степень поляризации ЖР излучения в вершине петли вплоть до нулевых значений, в зависимости от плотности энергии турбулентности и масштаба турбулентной области.

УНИПОЛЯРНЫЕ МИКРОВСПЫШКИ: ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Думин Ю.В.[1,2], **Верещагин Ф.В.**[1], **Сомов Б.В.**[1]

[1]*ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, dumin@yahoo.com*
[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Униполярные микровспышки – это необычный тип вспышечных явлений на Солнце, в которых светящиеся дуги опираются своими концами на области одинаковой полярности на поверхности фотосферы (или же на области без существенных магнитных полей), т.е. такие дуги заведомо не могут являться магнитными силовыми линиями, как в обычных вспышках. Возможность существования униполярных вспышек была теоретически предсказана ещё в конце 1980-х годов в работах, проводившихся в Теоретическом отделе ФИАН. Физический механизм соответствующих явлений связан с развитием энерговыделения вдоль траектории быстро движущейся нулевой точки, которая возникает в результате бифуркации по механизму “топологического триггера” [1].

К сожалению, наблюдательная идентификация таких событий стала возможна лишь в последние годы, в основном, благодаря использованию изображений высокого разрешения в линии CaII со спутника *Hinode*, а также высокоточных магнитограмм со спутника *SDO* [2]. Весьма перспективным является также использование изображений в линии HeI, получаемых на New Solar Telescope в Big Bear Solar Observatory (Калифорния, США).

В последнее время в Отделе физики Солнца ГАИШ МГУ проводился анализ архивов данных, накопленных различными наблюдательными инструментами, направленный на идентификацию униполярных микровспышек. При этом было установлено, что такие вспышки являются хотя и нечастым, но достаточно регулярно встречающимся явлением в периоды наиболее высокой солнечной активности (например, 2014–2015 гг.) в областях Солнца, содержащих множественные пятна перемежающейся полярности; в качестве типичного примера, см. Рис. 1. В настоящее время нами предпринимаются попытки разработки алгоритмов для автоматизированной идентификации униполярных микровспышек. Кроме того, ведутся теоретические работы по обобщению эффекта “топологического триггера”, ответственного за такие вспышки, на случай магнитных полей, содержащих большое количество источников различной полярности [3].

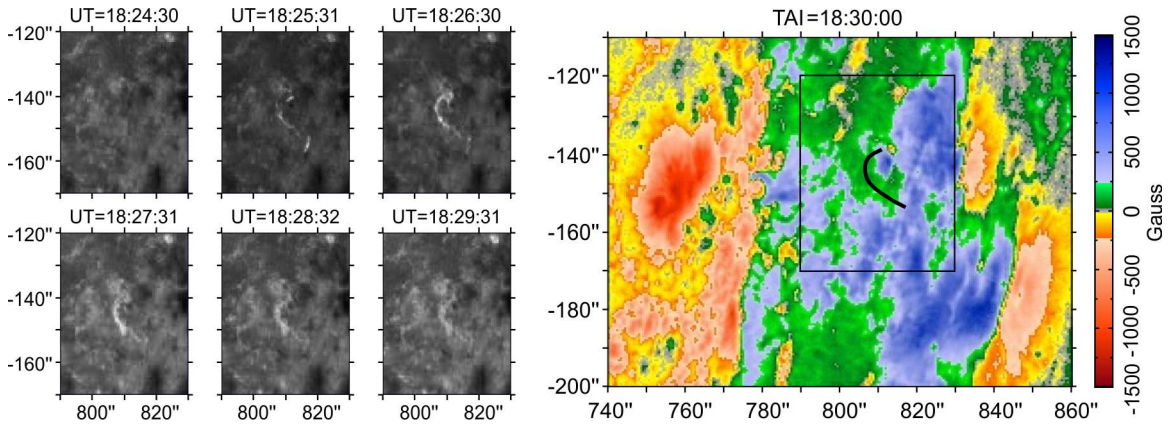


Рис. 1. Пример униполярной микровспышки 16.02.2014 в линии CaII (*Hinode*).

1. Горбачев В.С., Кельнер С.Р., Сомов Б.В., Шварц А.С. // Астр. журн. 1988. Т. **65.** С. 601.
2. Dumin Yu.V., Somov B.V. // Res. Not. Amer. Astron. Soc. 2017. V. **1.** P. 15.
3. Zhuzhoma E.V., Medvedev V.S., Dumin Yu.V., Somov B.V. // Preprint arXiv:2111.06730 (2021).

СОЛНЕЧНЫЕ И ЗВЁЗДНЫЕ ВСПЫШКИ: ЧАСТОТА ПОЯВЛЕНИЯ, СВОЙСТВА АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗВЁЗДНОГО ДИНАМО

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

1 – ГАИШ МГУ им.М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, 2 – ИЗМИРАН им. Н.В.Пушкова, Троицк, г. Москва, Россия, 3 – Физический факультет МГУ им.М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия mkatsova@mail.ru maria@sai.msu.ru

На основе анализа частоты встречаемости мощных солнечных рентгеновских вспышек классов M и X и супервспышек на звёздах показано, что с учётом изменения параметров запятненности и компактности активных областей обе совокупности можно описать единой моделью. Тем самым проблема супервспышек на звёздах и их отсутствия на Солнце сводится к проблеме различия в эффективности механизмов динамо.

СОЛНЕЧНЫЕ ПРОТОННЫЕ СОБЫТИЯ БЕЗ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ II ТИПА

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

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

[2]*НИИЯФ, г. Москва, Россия*

[3]*ИПГ, г. Москва, Россия*

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

[5]*ГЦ РАН, г. Москва, Россия*

Многие солнечные протонные события (СПС) сопровождаются радиоизлучением II типа и так называемыми «радио-звучащими корональными выбросами массы (КВМ)». В этом случае установлена прямая связь между ударной волной в короне (радиоизлучение II типа) и в межпланетном пространстве (КВМ). Статистические связи между СПС и радиоизлучением II типа с радио-звучащими КВМ исследовались в нашей предыдущей работе. Мы выделили СПС, которые сопровождались радиоизлучением II типа, не столь очевидно связанным с КВМ. Некоторое число СПС вообще не сопровождались радиоизлучением II типа. Мы пытаемся найти особенности таких СПС.

Работа поддержана грантом РФФИ № 19-02-00264.

ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ С НЕПРЕРЫВНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ПЛАЗМУ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭМИССИИ

Анненков В.В., Волчок Е.П., Тимофеев И.В.

ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия,
НГУ, физический факультет, г. Новосибирск, Россия
v.v.annenkov@inp.nsk.su

Одним из базовых вопросов физики плазмы является проблема взаимодействия электронных пучков с плазмой. В контексте солнечной физики пучково-плазменное взаимодействие представляет особый интерес для интерпретации различных радиовсплесков. В лабораторной плазме аналогичные процессы исследуются с целью получения мощных источников ТГц излучения [1], а также для создания [2], нагрева и улучшения удержания термоядерной плазмы в открытых магнитных ловушках.

Мощным инструментом для изучения пучково-плазменного взаимодействия является численное моделирование методом частиц в ячейках. Наиболее распространённой моделью является модель бесконечной плазмы, в которой на границы системы накладываются периодические граничные условия. В данной работе мы сравниваем этот подход с более реалистичной моделью с открытыми граничными условиями и непрерывно инжектируемым пучком. Результаты моделирования в рамках этих моделей имеют существенные различия. Так, в модели с инжекцией наблюдается формирование сильно локализованного волнового пакета. За счёт непрерывной инжекции свежих частиц амплитуда плазменных колебаний достигает в разы больших значений. Меняются динамика ионов и степень нагрева электронов плазмы. Существенными становятся механизмы электромагнитной эмиссии [3,4], не наблюдаемые в приближении бесконечной плазмы.

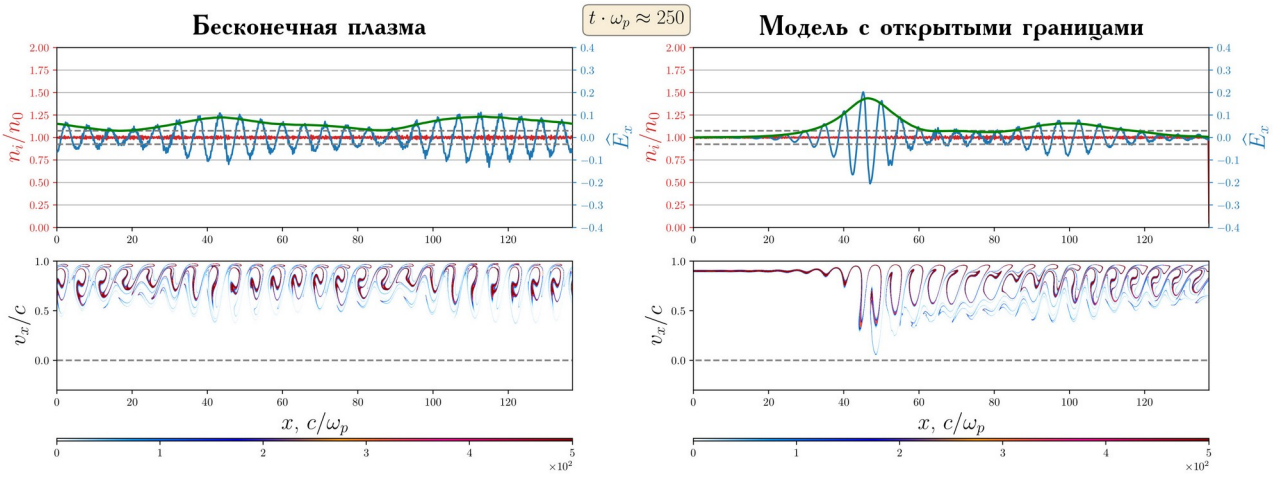


Рис.1. Релаксация электронного пучка с плотностью n_b=0.01n_0 и направленной скоростью vb=0.9c в плазме с плотностью n_0 в двух моделях. Сверху: Безразмерное электрическое поле E_x и плотность ионов плазмы. Снизу: фазовый портрет электронов пучка.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-2676.2021.1.2.

1. Arzhannikov, A. V. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion 2020 V. **62**, P. 045002.
2. Soldatkina, E. I. et al. // Nucl. Fusion 2021 doi:10.1088/1741-4326/ac3be3.
3. Annenkov, V. V., Timofeev, I. V. & Volchok, E. P. // Phys. Plasmas 2019. V. **26.** P. 063104.
4. Annenkov, V. V., Volchok, E. P. & Timofeev, I. V. // Astrophys. J. 2020 V. **904**, P. 88.

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОГО И УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ВСПЫШЕК, СОПРОВОЖДАЮЩИХСЯ КОРОНАЛЬНЫМИ ВЫБРОСАМИ МАССЫ

Бакунина И.А.[1], **Мельников В.Ф.**[2], **Абрамов-Максимов В.Е.** [2], **Шаин А.В.**[2]

[1]*НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия, rinbak@mail.ru*
[2]*ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

Исследованы особенности пространственной и временной динамики микроволнового и ультрафиолетового излучений (данные радиогелиографа Нобеяма, SDO/AIA), а также магнитных полей (SDO/HMI) для 8 активных областей (АО), в которых произошли вспышки рентгеновского класса M, сопровождающиеся КВМ (корональными выбросами массы). На этой выборке установлено, что вспышки, сопровождающиеся КВМ, чаще всего возникают в открытых магнитных конфигурациях, в областях со скрученными магнитными жгутами, с всплывающими потоками. КВМ также наблюдаются чаще всего во вспышках большей длительности и в тех АО, которые имеют более протяженные по площади источники в микроволновом излучении.

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ПАРАМЕТРАМИ СПЕКТРОВ ОКОЛОЗЕМНЫХ ПРОТОННЫХ ВОЗРАСТАНИЙ, ВСПЛЕСКОВ ЖЁСТКОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И СКОРОСТЯМИ КВМ

В.И. Киселёв, Н.С. Мешалкина, В.В. Гречнев

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

В некоторых исследованиях предлагается сценарий переноса ускоренных во вспышке протонов в эруптирующем магнитном жгуте до его пересоединения с открытой магнитной структурой, освобождающего захваченные протоны. Кулоновские столкновения в магнитном жгуте обедняют спектр протонов в области низких энергий. С другой стороны, ускорение на ударной волне постепенно восполняет эту часть спектра. Эти процессы формируют двойной степенной спектр протонов, обычно наблюдаемый на орбите Земли. Проанализированы корреляции между наклонами спектров околоземных протонных возрастаний ниже энергии излома спектра и выше неё, фотонными индексами соответствующих всплесков жёсткого рентгеновского излучения и скоростями корональных выбросов массы (КВМ). Использованы каталоги протонных событий в 1991–2006 г., спектры жёсткого рентгеновского излучения, полученные Yohkoh и RHESSI, и каталоги КВМ. Значимые корреляции обнаружены между наклонами спектра протонов: 1) выше энергии излома и спектральными индексами жёсткого рентгеновского излучения (0,86) и 2) ниже энергии излома и скоростями КВМ (-0,75). Для проанализированного набора событий энергии излома находятся в диапазоне от 3 до 60 МэВ. Результаты указывают на статистическое преобладание вспышечного ускорения для более высоких энергий протонов и ускорения ударными волнами для более низких энергий. В спектрах протонов наивысших энергий, восстановленных для событий с наземными возрастаниями интенсивности космических лучей (GLE), обнаруживается второй излом и наиболее крутой наклон выше него. Ни этот наклон, ни энергия второго излома не коррелируют ни с одним другим параметром. Этот факт требует дальнейшего анализа. Выявлено различие параметров спектров протонов в событиях с GLE и без них. Характерные для этих двух типов событий наклоны спектров протонов выше энергии излома отличаются в полтора раза, а отличий наклонов спектров протонов ниже энергии излома не наблюдается, что согласуется с выводами Mewaldt et al. (2012, Space Sci. Rev. 171, 97). Для исследованных наборов событий также выявлено отличие характерных значений параметра $\lg(I_{10}/I_{100})$ в два раза и энергий изломов в три раза. Постановка задачи, анализ статистических соотношений и обсуждение результатов выполнены за счёт гранта Российского научного фонда № 21-72-00039 (В.И. Киселёв). Отбор событий, обработка и анализ данных жёсткого рентгеновского излучения (В.В. Гречнев, Н.С. Мешалкина) выполнены при поддержке Минобрнауки России.

БЫСТРОЕ СТУПЕНЧАТОЕ УМЕНЬШЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОТОКА АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ №12673 ВО ВРЕМЯ ВСПЫШКИ БАЛЛА X9.3

Головко А.А., Салахутдинова И.И.

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

Активная область №12673 показала высокую вспышечную активность и произвела 4 вспышки класса X 6, 7 и 10 сентября 2017 г. В ней обнаружены высокие значения индукции магнитного поля, превышающие 5 кГс [1]. Во вспышке X8.2 10.09.2017 обнаружена трансформация магнитной энергии в нетепловую энергию ускоренных электронов за интервал времени около 2 мин [2].

Выполнен анализ структуры и динамики магнитного поля по данным HMI SDO и SOT Hinode. Суммарный беззнаковый магнитный поток (суммарный без учета знака продольной компоненты поля) активной области 6 сентября с 8 до 13 час UT снижался со средней скоростью $0{,}8 \times 10^{17}$ Мкс/с, за исключением двух коротких временных интервалов солнечных вспышек баллов X2.2 (08:57-09:17) и X9.3 (11:53-12:10). В указанные интервалы произошло ступенчатое уменьшение потока со скоростями $2{,}4 \times 10^{18}$ Мкс/с при вспышке X2.2 и 4×10^{18} Мкс/с при вспышке X9.3, намного превышающими все эволюционные изменения. Эта скорость претендует на роль рекордной для 24-го солнечного цикла, как и величина коронального магнитного поля в активной области [1]. Интервалы времени этих ступенчатых изменений составили 2-3 мин. Мультифрактальный анализ показал, что проявлявшиеся во вспышках центры активности характеризовались увеличенной по сравнению с окружением перемежаемостью рельефа магнитного поля и лучевой скорости.

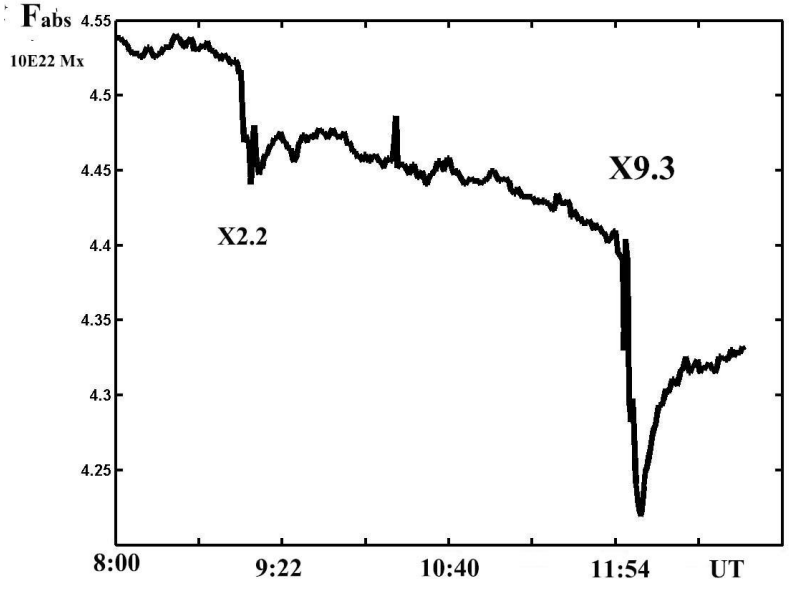


Рис. 1. Временная эволюция беззнакового магнитного потока АО №12673 6.09.2017 по данным HMI SDO. При вспышке балла X9.3 вслед за резким падением потока в течение 2 мин, видна релаксация с подъемом потока, что демонстрирует как обратимые, так и необратимые изменения магнитного поля в течение вспышки.

1. Anfinogentov S.A., Stupishin A.G., Mysh'yakov I.I. et al. Record-breaking Coronal Magnetic Field in Solar Active Region 12673 //Astrophys. Journ. Lett.,2019, 880:L29.
2. Fleishman G.D., Gary D.E., Chen D. et al. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare // Science, 2020, 367, 278-280.

ДИНАМИКА СПЕКТРА МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВСПЫШЕК ПО ДАННЫМ СИБИРСКОГО РАДИОГЕЛИОГРАФА

Мельников В.Ф.[1], Мешалкина Н.С.[2], Жданов Д.А.[2]

[1] *Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, v.melnikov@gaoran.ru*

[2]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*

Исследование динамики частотного спектра микроволнового излучения вспышек может многое сказать о физических условиях в источнике этого излучения. Это относится, прежде всего, к таким параметрам, как наклон энергетического спектра и характер питч-углового распределения нетепловых электронов, напряжённость магнитного поля, плотность плазмы, а также некоторые другие параметры.

В настоящем исследовании основное внимание уделено динамике наклона спектра и временным задержкам в области относительно низких частот ($f < f_{peak}$) во время вспышки 23 сентября 2021 г. Эта вспышка является одной из первых, зарегистрированных на недавно созданном Сибирском радиогелиографе (СРГ) на 6-ти частотах в диапазоне 3–6 ГГц. Угловое разрешение радиогелиографа позволяло проводить сравнительный анализ динамики излучения из различных участков микроволнового источника на разных частотах. Дополнительно для анализа частотного спектра использовались данные спектрополяриметров 4-8 ГГц и 2-24 ГГц, так же, как и СРГ, находящиеся в Радиоастрофизической обсерватории «Бадары» ИСЗФ СО РАН.

Работа выполнена в рамках Государственного задания №1021032422589-5 и при частичной поддержке гранта РФФИ_Чехия № 20-52-26006.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛАДА РАЗЛИЧНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ФАЗЕ СПАДА СОЛНЕЧНЫХ И ЗВЕЗДНЫХ ВСПЫШЕК

Мотык И. Д., Кашапова Л.К.

ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, ilymotyk@gmail.com

Несмотря на то, что фаза спада как солнечных, так и звездных вспышек редко связана с мощными эруптивными процессами, выделяемая во время этого периода энергия сравнима с энергией импульсной фазы. Часто на основной процесс затухания излучения и охлаждения плазмы накладываются различные волновые процессы, изменяющие классический временной профиль солнечной вспышки.

Традиционно считается, что процесс охлаждения плазмы на фазе спада вспышек определяется теплопроводностью и радиационными потерями. Считается, что радиационные потери начинают доминировать приблизительно с момента падения температуры вспышечной плазмы до половины её максимального значения. Однако сравнение наблюдательных данных с моделями в Rayan et al. (2013) указывает на более длительное время охлаждения, чем предсказывает стандартная модель. Одной из причин может быть отличие вкладов процессов в охлаждение плазмы от используемого в стандартной модели.

Цель данной работы уточнить момент смены доминирования процессов для временных профилей вспышечного излучения нижних слоев атмосферы. Для этого была использована модель Cargill et al (1995) и проведен анализ усредненных временных профилей фазы спада вспышки в полосах SDO/AIA 304 Å, 1600 Å и 1700 Å для Солнца, а также излучения в белом свете карлика, спектрального класса M4. Было обнаружено, что радиационные потери доминируют на гораздо более длительном временном отрезке, чем предсказывает теория для излучения в короне. Обсуждается использование полученных результатов для анализа взаимосвязи между доминирование процесса теплопроводности и плотностью атмосферы, а также для объяснения вспышек с длительной фазой спада.

ИЗУЧЕНИЕ СВЯЗИ МЕЖДУ МИКРОВОЛНОВЫМИ И МЕТРОВЫМИ ВСПЛЕСКАМИ ВО ВРЕМЯ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ 3 ИЮНЯ 2021 ГОДА

Шамсутдинова Ю.Н., Zhang J., Жданов Д.А., Reid H.A.S., Кашапова Л.К.

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

Представляем первые результаты исследования события, произошедшего 01:36 UT 3 июня 2021 года и наблюдавшегося одновременно в метровом радиодиапазоне спектрографами сети E-Callisto в диапазоне 15-87 МГц и на Сибирским Радиогелиографом (СРГ) в диапазоне 3-6 ГГц.

Исследование динамических спектров в метровом диапазоне выявило, что событие состоит из серии радиовсплесков III типа и J типа. Предварительный анализ скорости дрейфа радиовсплесков указывает на разные задержки у разных радиовсплесков относительно места первичного энерговыделения в солнечной атмосфере.

Во временных профилях рентгеновского диапазона (GBM/FERMI) выявлен только один всплеск, и он соответствует самому мощному радиовсплеску III типа. Спектральный анализ микроволнового и рентгеновского излучения указывает наличие ускоренных электронов и общую природу излучения в этих диапазонах. Исследование изображений СРГ в микроволновом диапазоне 2.8-5.6 ГГц выявило существование двух источников излучения с различной динамикой. Сравнение временных профилей, полученных для двух источников, позволило найти задержки между микроволновым и метровым излучением в диапазоне 75-79 МГц.

Обнаруженные задержки согласуются с результатами, полученными при анализе метровых динамических спектров. Обсуждается возможный сценарий данного события.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Лондонского Королевского Общества 21-52-10012 КО-а.

ЭНЕРГЕТИКА ПРЕДВСПЫШЕЧНОЙ ФАЗЫ И НАЧАЛА ИМПУЛЬСНОЙ ФАЗЫ ЭРУПТИВНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ВСПЫШКИ X5.4 КЛАССА 25 ФЕВРАЛЯ 2014 Г.

Шарыкин И.Н., Зимовец И.В., Моторина Г.Г.

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

В работе представлены результаты анализа рентгеновского и ультрафиолетового излучения в предвспышечной фазе и начале импульсной фазы эруптивной солнечной вспышки X5.4 класса, произошедшей 25 февраля 2014 г. Событие примечательно тем фактом, что морфология источников излучения в предвспышечной фазе соответствует модели tether-cutting. Данное обстоятельство, а также удачное расположение вспышечных магнитных петель относительно луча зрения вблизи лимба Солнца и обилие качественных данных наблюдений в различных диапазонах электромагнитного спектра мотивировало нас исследовать данное событие с целью оценки разных типов энергий в предвспышечной фазе в рамках модели tether-cutting.

Используются данные наблюдений рентгеновского излучения GOES и RHESSI, а также ультрафиолетовые изображения AIA/SDO. Рентгеновские спектры анализируются в рамках тепловой и нетепловой модели. Скорости течений плазмы оцениваются с помощью локального корреляционного анализа ультрафиолетовых изображений. Анализ дифференциальной меры эмиссии проводится с целью оценки тепловой энергии плазмы, излучающей ультрафиолетовое излучение. На основе данного комплексного анализа мы производим оценки тепловой, нетепловой, кинетической энергии плазмы. Сравниваются концентрация тепловой плазмы и ускоренных электронов. Также производится оценка темпа магнитного пересоединения в предвспышечном токовом слое.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 20-72-10158 «Прекурсоры и первоначальное энерговыделение солнечных вспышек».

В КАКИХ СЛУЧАЯХ МАКСИМУМ МЕРЫ ЭМИССИИ МОЖЕТ ОПЕРЕЖАТЬ МАКСИМУМ ТЕМПЕРАТУРЫ ВСПЫШЕЧНОЙ ПЛАЗМЫ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ GOES

Шаховская А.Н.[1], Григорьева И.Ю.[2]

[1]*КрАО РАН, пгт. Научный, Крым, Россия, anshakh@yandex.ru*

[2]*ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*

Вспышка 08.03.11 на юго-западном лимбе 2:24 начало балл GOES M1.3, опережение максимума EM максимума температуры на 6 секунд. За приблизительно 30 минут до этого события в SDO AIA 1600 Å в этой же АО микроджет на юго-западном лимбе. В GOES в это время микровспышка балла меньше С, но более выражена в канале 0.5 Å. По RHESSI этой микровспышке соответствует пик более всего выраженный в 6-12 кэв.
Вспышка 16.10.13 в14:26 балл по GOES C8.9, опережение максимума EM максимума температуры на 113 секунд, за 32 минуты до этого события произошла вспышка в другой, но достаточно близкой АО, балла С1.4. По GOES первая вспышка была более выражена в канале 0.5 Å. По RHESSI первой вспышке соответствовал пик HXR в диапазонах 3-6 и 6-12 кэв. Во время второй вспышки пик был значительно менее выражен.
В обоих случаях более мощной вспышке предшествовала микро или более слабая вспышка, более заметная в HXR и в канале 0.5 Å. Однако, вспышка 16.10.13 произошла в другой АО. Поэтому мы считаем, что опережение максимума EM относительно максимума температуры, связано не с физическими характеристиками самих вспышек, а с методикой расчета EM и температуры, в которой не учитывается влияние микровспышек незадолго до непосредственно самих событий.

Работа поддержана субсидиями по темам «Многоволновая активность Солнца» (ИЮГ) и «…..» (ШАН).

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЦА И ПАРАМЕТРОВ КОРОНАЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ НА ЭРУПТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ В 24 ЦИКЛЕ

Биленко И.А.

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

Солнечная корона не находится в состоянии гидростатического равновесия и, следовательно, происходит постоянное истечение корональной плазмы в межпланетное пространство. Формируются потоки солнечного ветра. Так как электропроводность корональной плазмы очень высокая, то эти потоки регулируются солнечными магнитными полями. Потоками солнечного ветра солнечные магнитные поля выносятся в межпланетное пространство, формируя межпланетное магнитное поле.

В 24 цикле наблюдалось дальнейшее снижение напряженности глобального магнитного поля (ГМП) Солнца. Общее уменьшение ГМП - это результат суммарного снижения полярного и не полярного магнитных полей, которые являются видимым проявлением полоидальной и тороидальной компонент ГМП Солнца. Так, полярное магнитное поле в минимуме 24 цикла уменьшилось, примерно, на 40% по сравнению с полярным полем в минимуме 23 цикла. В 24 цикле резко снизилось и число активных областей. Это привело к изменению параметров корональной плазмы и характеристик межпланетной среды. Как следствие, на 30% уменьшилась напряженность межпланетного магнитного поля, снизилось суммарное магнитное и газовое давление, альвеновская скорость, понизились параметры фонового солнечного ветра. В 24 цикле изменилась и топология структуры ГМП. Структура ГМП становится более хаотичной, размеры структур уменьшаются и наблюдаются их частые реорганизации. Все это привело к уменьшению числа мощных вспышек, событий SEP. При значительном росте общего числа корональных выбросов массы (КВМ) число мощных КВМ уменьшилось в 24 цикле.

На основе данных наблюдений наземных и космических обсерваторий проанализированы и сопоставлены циклические вариации солнечных магнитных полей, параметров корональной плазмы и КВМ в 23 и 24 циклах. Рассмотрено влияние снижения как полярного, так и не полярного магнитных полей Солнца и значений корональной плазмы в 24 цикле на условия формирования и параметры КВМ.

Результаты свидетельствуют, что циклические изменения ГМП определяют долговременные, на масштабах Кэррингтоновских оборотов и более, вариации параметров плазмы межпланетной среды. Снижение плотности и давления межпланетной плазмы в 24 цикле привели к более быстрому увеличению угла раствора КВМ и наблюдаемому росту числа КВМ с углом раствора более 90°. Рост числа КВМ в 24 цикле не соответствует резкому уменьшению числа пятен. Тогда как снижение напряженности полярной и не полярной компонент ГМП Солнца и изменение топологии структуры ГМП в 24 цикле могли привести к значительному росту общего числа КВМ. Однако циклические вариации числа и параметров разных типов КВМ имеют разный характер. В 24 цикле возросло не только общее число КВМ, но изменились и зависимости разных типов КВМ от фотосферных магнитных полей разной напряженности. Показана связь этих различий с различной динамикой магнитных полей разного масштаба и напряженности в 23 и 24 циклах.

ХАРАКТЕРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И НАБЛЮДАЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРЯЧИХ СТРУЙ В НИЖНЕЙ КОРОНЕ СОЛНЦА

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

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

Разнообразие физических условий и возможность детальных наблюдений делает солнечную плазму естественной лабораторией для исследования самых различных физических процессов ответственных за генерацию, коллимацию и распространение плазменных струй. Широкие возможности для изучения и диагностики плазменных струй открывает постоянный мониторинг излучения Солнца в радио, оптическом, УФ, КУФ, рентгеновском и гамма диапазонах высокопрецезионными инструментами наземного и космического базирования. Благодаря открытому доступу к наблюдательным данным мы получили возможность создать пополняемый «Каталог горячих плазменных струй в короне Солнца» (https://solar.sao.ru/coronal-jets-catalog/), и проводить исследования струй на его основе. В каталог сведены данные, полученные с помощью космического высокопрецизионного телескопа КУФ диапазона SDO/AIA и наземных радиотелескопов, и спектрометров, включая РАТАН-600, СРГ и NoRH. В некоторых случаях наблюдательные данные были дополнены информацией о конфигурациях реконструированного коронального магнитного поля и расчетами радиоизлучения.

На основе обновленного каталога в докладе представлено исследование характерных особенностей плазменных струй. Основное внимание сосредоточено на крупномасштабных "горячих" струях с температурой выше 0.5 МК, наблюдаемых в короне Солнца. База каталога использована для предварительного статистического анализа наблюдаемых параметров струй. Приведены полученные в результате отождествления струй в однородных временных сериях КУФ-изображений специально разработанным алгоритмом оценки их скоростей, длительности, протяженности, вытянутости и т. п. Обсуждается диапазон наблюдательных характеристик струйных течений как в сильных магнитных полях активных областей, так и вне их. Разрабатываемый каталог создает надежную наблюдательную базу для поиска статистических закономерностей в ансамбле наблюдаемых струй и активных областей, в которых они возникают. В дальнейшем особенности распределения струй могут позволить впервые произвести эмпирическую классификацию горячих струй, что может быть связано с генерацией струй различными механизмами.

В докладе демонстрируются характерные примеры разнообразных струйных течений. Обсуждается их связь с конфигурациями магнитного поля и с возможными МГД процессами, изгибными и медленными колебаниями в контексте их соответствия существующим моделям генерации, коллимации и эволюции струй.

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

НАБЛЮДЕНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ СТРУЙ НА СИБИРСКОМ РАДИОГЕЛИОГРАФЕ

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

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

Плазменные струи в короне Солнца представляют собой течения плазмы вдоль силовых линий магнитного поля. Как правило, струи хорошо видны в линиях крайнего ультрафиолета (КУФ) в виде динамических вытянутых структур, и часто обнаруживаются на изображениях, получаемых инструментом AIA Обсерватории солнечной динамики (SDO/AIA). Характерные размеры струй обычно не превышают нескольких десятков секунд дуги, а их яркость как в КУФ, так и в радиодиапазоне значительно меньше яркости активных областей. При наблюдениях струй в микроволновом излучении эти обстоятельства обуславливают высокие требования к пространственному разрешению, чувствительности и динамическому диапазону радиотелескопа. Это приводит к тому, что большая часть струй, видимых на изображениях SDO/AIA, никак не проявляет себя в данных микроволновых наблюдений. Тем не менее в отдельных случаях, крупные и яркие струи удается не только регистрировать в виде вариаций потока радиоизлучения, но и получать их микроволновые изображения.

Возможности по наблюдению корональных струй, а также других слабоконтрастных образований, в микроволновом диапазоне существенно улучшились с сооружением Сибирского Радиогелиографа (СРГ), который будет выполнять регулярные многоволновые наблюдения Солнца в диапазоне 3-24 ГГц с высоким пространственным и временным разрешениями. В прошедшем 2021 году проводились регулярные наблюдения в тестовом режиме на антенной решетке 3-6 ГГц, а с декабря 2021 начались наблюдения на решетке 6-12 ГГц, также в тестовом режиме.

За этот период мы обнаружили ряд случаев, когда по данным СРГ удалось получить пространственно-разрешенные изображения корональных струй на нескольких частотах и детально изучить их динамику. Наблюдения СРГ сопоставлены с КУФ изображениями, полученными SDO/AIA. В качестве контекстной информация о магнитном поле в материнской активной области использованы результаты восстановления коронального магнитного поля по фотосферным магнитограммам SDO/HMI в приближении NLFFF, а также микроволновые спектры, полученные РАТАН-600. Продемонстрировано, что пространственно-разрешенные наблюдения в микроволновом диапазоне содержат уникальную информацию об инициации струй и их динамике, а также позволяют получить сведения о физических условиях в короне материнской активной области.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 18-29-21016 мк).

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЕННЫХ СТРУЙ ВО ВРЕМЕННЫХ СЕРИЯХ ИЗОБРАЖЕНИЙ СОЛНЦА

Ступишин А.Г.[1], Анфиногентов С.А.[2], Кальтман Т.И.[3]

[1]*Санкт-Петербургский Гос.Университет, г. С.-Петербург, Россия, agstup@yandex.ru*
[2]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*
[3]*Специальная астрофизическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия*

Доклад посвящен дальнейшему развитию метода автоматического поиска струй в однородных временных сериях изображений [1]. Метод основан на выделении контрастных деталей на изображениях «бегущей разности» (разности наблюдаемых интенсивностей в соседние моменты времени).

В крайнем ультрафиолете динамичная солнечная атмосфера содержит множество транзиентных струйных явлений, которые проявляются в виде коллимированных плазменных струй на всех высотах от хромосферы и до внешней короны. Независимо от фазы солнечного цикла это почти повсеместное явление: струи можно наблюдать в активных и спокойных областях, в корональных дырах, в центре диска и на лимбе. С различными условиями появления струй связано многообразие их морфологических характеристик. Форма струй значительно меняется не только для разных деталей, но и в процессе эволюции детали. Для алгоритмов отождествления в изображениях заданных объектов невозможно подобрать такие параметры, при которых будут выделены все струи множественных подтипов, и в то же время к ним не будут «примешиваться» похожие на них объекты, такие как уярчения петель или сгущения плотности на фронтах ударных волн. Требования к алгоритму также возрастают, если нужно определять не только длину и вытянутость объекта, но и такую важную для интерпретации физических процессов эволюции струи, как скорость, которая может быть различна в разных частях струи и по-разному меняться в течение ее эволюции.

Для каталога (https://solar.sao.ru/coronal-jets-catalog/), для которого изначально разрабатывался этот алгоритм, нам нужно было выделить горячие, достаточно длительные, вытянутые струи, и были определены соответствующие настроечные параметры. Для поиска других струйных течений (например, мелких и более холодных хромосферных струй или, наоборот, только крупных плазменных выбросов, переходящих в КВМ) можно подстраивать этот алгоритм, меняя его параметры.

В докладе анализируются метрики, которые можно использовать для автоматической обработки данных: оценки длительности, различные оценки других параметров: размеров события, различных оценок: «вытянутости» (отношения характерной длины к характерной ширине); скоростей, контрастности бегущей разности, и ряда других. Описаны детали построения бегущей разности с учетом особенностей наблюдений по данным SDO/AIA. Показана необходимость учета шумовой компоненты и медианного уровня интенсивности в наблюдениях, а также возможных ошибок в используемых данных. Приводятся характерные примеры выделенных разработанным методом событий.

Работа поддержана грантом РФФИ 18-29-21016.

1. Ступишин А.Г., Анфиногентов С.А., Кальтман Т.И. // Геомагнетизм и Аэрономия 2021. V. 61 № 8.

РАЗНИЦА В ХАРАКТЕРИСТИКАХ СОЛНЕЧНЫХ МАКРОСПИКУЛ НА ВЫСОКИХ И НИЗКИХ ГЕЛИОШИРОТАХ

Богачёв С.А.[1,2], Лобода И.П.[1,2], Кузин С.В.[2], Ульянов А.С.[1,2], Рева А.А.[1,2], Кириченко А.С[1,2].

[1]ИКИ РАН, г. Москва, Россия, bogachev.sergey@gmail.com, [2]ФИАН, г. Москва, Россия

Солнечные макроспикулы это вертикальные структуры, наблюдающиеся на краю солнечного диска в вакуумной УФ области спектра (чаще всего в линии ионизованного гелия He_{II} 304 А, а также иных линиях переходного слоя солнечной атмосферы, таких как N_{IV} 765 А, и O_V 630 А. Название "макроспикулы" было введено Бохлином и др. [1] и явно указывает на сходство этих явлений с обычными солнечными спикулами, хорошо известными из наблюдений в оптическом диапазоне, прежде всего в линии H_α (см, например, [2,3]). Действительно, и в том и в другом случае речь идёт о движениях солнечного вещества, которое сначала поднимается над поверхностью Солнца в виде относительно узкого столба, а затем опускается вниз. Макроспикулы, как это следует из названия, заметно больше по размеру, чем спикулы (достигают высоты 70 тыс. км против около 10 тыс. км у обычных спикул), происходят реже, а, главное, формируются на больших высотах – не вплотную к фотосфере, а выше, на границе между переходным слоем и короной Солнца.

В настоящей работе мы исследовали в работе 49 солнечных макроспикул, наблюдавшихся в 2010 году, на фазе роста солнечного цикла, на высоких (околополярных) и на низких широтах вблизи солнечного экватора. Мы нашли, что темп формирования макроспикул, в пределах точности измерения не зависит от широты и составляет около 0.1 $град^{-2}$ $час^{-1}$. Одновременно установлено, что средняя высота макроспикул вблизи экватора и полюсов заметно различается. После устранения эффектов проекции нами получено значение 31.7 ± 0.2 тыс. км для макроспикул на низких широтах и 39.1 ± 0.2 тыс. км для высокоширотных макроспикул.

Главным результатом работы является то, что ансамбль макроспикул, который ранее всегда рассматривался как однородный, может быть разделён на 2 группы по высоте: низкоширотные и высокоширотные макроспикулы. Насколько нам известно, ранее в литературе данный факт не отмечался. Причиной различия мы видим разницу в структуре магнитного поля у полюсов и на средних и низких широтах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 21-72-10157.

1. Bohlin J.D., Vogel S.N., Purcell J.D., et al. // Astrophys. J. Letters 1975. V. **197**. L133
2. Beckers J.M. // Solar Phys. 1968. V. **3**. P. 367
3. Beckers J.M. // ARA\&A 1972. V. **10**. P. 73.

СОГЛАСОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ПРОЯВЛЕНИЙ УДАРНЫХ ВОЛН СО СЦЕНАРИЕМ ИХ ВОЗБУЖДЕНИЯ ИМПУЛЬСНО УСКОРЯЮЩИМСЯ МАГНИТНЫМ ЖГУТОМ

В.И. Киселёв, В.В. Гречнев, А.М. Уралов, И.И. Мышьяков

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

Возникновение ударных волн в солнечной короне остаётся предметом дискуссий. Неясны и закономерности распространения возмущений, наблюдаемых в крайнем ультрафиолете (EUV-волн), которые могут быть связаны с ударными волнами. В ряде исследований сделан вывод о возбуждении ударных волн корональными выбросами массы (КВМ) лишь после достижения ими сверхзвуковых скоростей расширения. Обсуждается также возможность возбуждения взрывных волн импульсным ростом давления плазмы во вспышечных структурах. В наших исследованиях выявлен единственный сценарий - возбуждение ударных волн импульсно ускоряющимися эруптивными структурами, а также показана проблематичность иных сценариев. Импульсное ускорение эруптивной структуры совпадает с фазой формирования полноценного магнитного жгута и максимальным темпом возрастания его объёма. Такое расширение генерирует поршневую волну, которая быстро становится ударной. В случаях с КВМ импульсное ускорение эруптивной структуры и образование поршневой волны происходит внутри формирующегося КВМ. Впоследствии, за пределами КВМ, режим поршневой ударной волны трансформируется либо в режим головной ударной волны, если КВМ быстрый, либо в режим затухающей взрывной волны, если КВМ медленный или отсутствует. Возникает вопрос, действительно ли реализуются разные механизмы возбуждения ударных волн, или же наблюдения, считающиеся свидетельствами в их пользу, можно согласовать в рамках импульсно-поршневого сценария. В настоящем докладе рассмотрены изучавшиеся другими авторами события, исследования которых были опубликованы ранее и содержат альтернативные сценарии. Подробный повторный анализ волновых возмущений в этих событиях показал их соответствие сценарию импульсно-поршневого возбуждения эруптивными структурами. Анализ солнечных эруптивных событий, измерения ударных волн и обсуждение результатов выполнены за счёт гранта Российского научного фонда № 21-72-00039 (В.И. Киселёв). Обработка данных, обзор сценариев возбуждения ударных волн, их количественное описание, восстановление и анализ корональных магнитных конфигураций (В.В. Гречнев, А.М. Уралов, И.И. Мышьяков) выполнены при поддержке Минобрнауки России.

ФАЗЫ УСКОРЕНИЯ КВМ И ИХ ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ

Струмиский А.Б.[1], Ожередов В. А.[1], Садовский А.М.[1], Григорьева И.Ю.[2]

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

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

Понимание процессов, приводящих к предельным режимам ускорения частиц и КВМ, представляет собой важнейшую задачу физики Солнца. В поле зрения коронографа LASCO C2 (1.5–6R_{Sun}) и C3 (4–30R_{Sun}) скорости КВМ, которые сопровождаются ускорением протонов >500 МэВ находятся в пределах 1500–3000 км/с. Эти значения задают диапазон величины ускорения ~3–13 км/с^2 (d = 0.5R_{Sun} — расстояние, пройденное КВМ до нижней границы C2) и его длительности ~500–240 с. Учет динамики КВМ в течение первых 30–40 мин после вспышки (в поле зрения LASCO C2) позволяет уточнить оценки a и τ; исследовать взаимозависимость вспышек и КВМ в конкретных событиях. Так как a ~ , то скорость подъёма КВМ в эруптивных вспышках зависит от величины магнитного поля и плотности , т. е. от эффективности «хромосферного испарения». Эруптивные вспышки с наличием (1) или отсутствием (2) хромосферных эффектов различаются величинами своего максимального магнитного поля, вовлеченного в процесс ускорения. Исследование отдельных событий показывает наличие, по крайней мере, двух фаз ускорения КВМ – импульсного и длительного , а также фазы равномерного распространения.

- Всплески нетеплового излучения наблюдаются как *до*, *во время* импульсного ускорения КВМ, так и *после* него, т.е. процессы ускорения заряженных частиц во вспышках, не зависят от величины ускорения КВМ;
- Наибольшая величина ускорения КВМ реализовалась во вспышках (1), в которых происходило ускорение электронов (всплески нетеплового излучения), сопровождавшееся изменениями меры эмиссии > $4\cdot10^{49}$ (см^{3}мин)$^{-1}$;
- Скорости КВМ в конце импульсного ускорения у вспышек (1) и (2) могут быть сравнимыми, но при этом у вспышек (2) типа в результате длительности ускорения скорость равномерного движения может быть больше.
- Наибольшие скорости равномерного распространения КВМ достигаются при комбинация вспышек (1)-(2) в одном событии.

В докладе будет представлено статистическое исследование всех случаев регистрации КВМ со скоростями больше 1200 км/с из базы данных LASCO, в которых выбраны события с регистрацией трех положений КВМ коронографом C2 и более пяти положений C3, для проверки гипотезы о трех фазах распространения КВМ и поиска их пространственных границ.

Работа поддержана субсидиями по темам «Плазма» (АБС, ВАО и АМС) и «Многоволновое активное Солнце» (ИЮГ).

О причинах отсутствия тонкой структуры радиоизлучения движущихся всплесков IV типа

Чернов Г.П., Фомичев В.В.

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

Краткий обзор тонкой структуры в известных явлениях показывает, что в движущихся радиовсплесках лишь иногда появляются широкополосные пульсации с периодами в несколько секунд или десятков секунд. В нескольких явлениях со специфическими особенностями источников (обгоняющие фронты) наблюдались серии волокон с частотным дрейфом характерным для всплесков II типа. Магнитное облако в виде источника континуального излучения движущегося всплеска IV является ловушкой для вспышечных электронов и протонов. Магнитная петля с повышенной плотностью является резонатором для быстрых магнитозвуковых волн, возбуждаемых протонами (Rosenberg (1970). Период колебаний быстрой МГД моды в петле с радиусом R много меньше длины L примерно равен величине

$$T \approx R(C_A + C_s)^{-1/2} \ , \qquad (1)$$

где C_A – альвеновская скорость, C_s – скорость звука. Для реальных значений в короне величины $(C_A + C_s)^{1/2} \approx 10^8$ см c^{-1} и $R \approx 10^8 – 10^9$ см период колебаний может меняться от 1 до 10 с. Быстрая МГД мода колебаний меняет пробочное отношений в петле с таким периодом. В рамках плазменного механизма континуальное излучение возбуждается электронами с конусной неустойчивостью, поэтому оно может быть промодулировано с таким же периодом (Zaitsev, Stepanov, Chernov (1984), и пульсации излучения объясняются естественным образом.

Но надо еще понять, почему другие виды тонкой структуры (волокна, спайки, зебра структура) обычно не наблюдаются и появляются лишь в специфических условиях, когда источник располагается, например, между двумя ударными фронтами Чернов и др. (2007).

Такая причина может быть связана с критическим углом конуса потерь для возбуждения вистлеров. Aurass et al. (1987) показали, что этот угол равен 3.58º. Питч угол конусной неустойчивости может быть более надежным, >> 3.58º с увеличением напряженности магнитного поля. Небольшое увеличение поля происходит в момент прохождения быстрой МГД моды. Однако это увеличение слишком мало ~ 10^{-2} (Aurass et al. (1987)). Если же с продвижением источника появляется ударный фронт, в котором поле повышается в несколько раз, конусная неустойчивость резко усиливается.

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ КОРОНЫ СОЛНЦА В РАДИОДИАПАЗОНЕ

Накаряков В. М.[1,2]

[1] *СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, V.Nakariakov@warwick.ac.uk*
[3] *Уорикский Университет, г. Ковентри, Великобритания*

Надежная диагностика физических условий и параметров в активных областях короны Солнца является одним из приоритетных направлений современной физики Солнца как для понимания фундаментальных физических процессов, ответственных за вспышечные энерговыделения и выбросы массы, так и для практических задач предсказания экстремальных событий космической погоды. Наблюдение и анализ колебательных процессов в плазменных структурах активных областей, в сочетании с развитием теории магнитогидродинамических (МГД) волн в плазменных неоднородностях позволяют производить сейсмологическую оценку ключевых физических параметров, таких как величина магнитного поля и его свободная энергия, мелкомасштабное структурирование плазмы поперек поля и величины транспортных коэффициентов.

В настоящее время основным источником входной информации для сейсмологической диагностики являются наблюдения из космоса в КУФ диапазоне. Недостаточное временное разрешение изображающих КУФ телескопов и телеметрические ограничения не позволяют наблюдать несколько важнейших для сейсмологии короны типов МГД колебаний: таких как сосисочные колебания, пакеты бегущих БМЗ волн и изгибные колебания высоких пространственных гармоник. Солнечные радиотелескопы и интерферометры нового поколения, такие как РАТАН-600 в режиме слежения, СРГ, e-OVSA и, в будущем, SKA, позволят достичь необходимой комбинации пространственного и временного разрешения и чувствительности для уверенного наблюдения этих типов МГД колебаний и использовать их для сейсмологической диагностики. Данная возможность иллюстрируется имеющимися эпизодическими наблюдениями короткопериодических МГД колебаний с помощью Нобеямского Радиогелиографа, РАТАН-600 и LOFAR. В частности, рассмотрены примеры идентификации сосисочных и изгибных колебаний плазменных петель и пакетов бегущих БМЗ, сформированных волноводной дисперсией.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-12-00195.

ОБ ИСТОЧНИКАХ ДЛИННОПЕРИОДНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ПУЛЬСАЦИЙ ПЕРЕД НАЧАЛОМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Зимовец И.В., Нечаева А.Б., Шарыкин И.Н., Низамов Б.А.

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

В работе [1] утверждается, что перед значительной долей (>1/3) “изолированных” солнечных вспышек наблюдаются длиннопериодные (с периодом 8-30 минут и длительностью 1-2 часа) квазипериодические пульсации в диапазоне мягкого рентгеновского излучения. Результаты получены по данным инструмента XRS/GOES, не обладающего пространственным разрешением. Авторы [1] рассматривают осцилляции электрического LRC контура (модель магнитных петель с продольным электрическим током) в качестве наиболее вероятного механизма обсуждаемых пульсаций и считают, что эти пульсации могут использоваться для прогнозирования вспышек.

В этой работе мы выполнили анализ источников длиннопериодных рентгеновских пульсаций перед началом ряда вспышек (в частности, тех, что явно представлены в [1]) по данным наблюдений RHESSI с пространственным разрешением. Дополнительно использованы изображения Солнца, полученные AIA/SDO в ЭУФ диапазоне, и векторные магнитограммы HMI/SDO. Для некоторых событий мы исследовали магнитное поле и вертикальные электрические токи в окрестности источников пульсаций.

Установлено, что по расположению источников предвспышечных пульсаций события можно разделить на три группы: I) источники пульсаций располагаются в различных, явно не связанных между собой активных областях (АО); II) источники всех пульсаций располагаются в одной АО, но испускаются последовательно из различных магнитных элементов (петель); III) источники всех пульсаций располагаются в одной АО и испускаются, по всей видимости, из одной комплексной магнитной структуры. В некоторых событиях видно, что пульсации могут представлять собой отдельные вспышки, состоящие из нескольких эпизодов энерговыделения.

Мы считаем, что наблюдения событий по крайней мере групп I и II не согласуются с механизмом осцилляций LRC контура. Для событий группы I наблюдаемые пульсации могут быть простым совпадением во времени независимых эпизодов энерговыделения в различных АО. На наш взгляд, наличие событий группы I не позволяет использовать рассматриваемые пульсации в качестве универсальных предвестников вспышек и строить надежные прогнозы вспышек с их помощью. Для событий группы II пульсации, по всей видимости, могут являться результатом последовательного вовлечения отдельных магнитных элементов в процесс предвспышечного энерговыделения (пересоединения) в результате эволюции магнитного поля в АО и подготовки ее к последующему относительно более мощному вспышечному энерговыделению. События группы III могут быть частным случаем событий группы II, когда не удается различить отдельные магнитные элементы, хотя пока нельзя исключить и другие возможности, в частности, связанные с механизмом LRC осцилляций или механизмами, связанными с МГД осцилляциями.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-72-10158).

1. Tan B., Yu Z., Huang J., Tan C., Zhang Y. // Astrophys. J. 2016. V. 833:206 (6pp).

НЕЛИНЕЙНЫЙ ОТКЛИК МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЛИНЕЙНУЮ СИММЕТРИЧНУЮ БМЗ ВОЛНУ

Куприянова Е.Г.[1], Кальтман Т.И.[2], Накаряков В.М.[2,3], Колотков Д.Ю.[3,4], Кузнецов А.А.[4]

[1] *ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, elenku@bk.ru*
[2] *СПбФ САО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Уорикский Университет, г. Ковентри, Великобритания*
[4] *ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Система плазменных неоднородностей в солнечной короне, осциллирующая как целое, может служить источником гиросинхротронного (ГС) излучения при наличии в ней электронов, ускоренных до среднерелятивистских энергий. Тем не менее, задача, в которой нетепловые электроны занимают не весь осциллирующий объём, ранее не рассматривалась. В данной работе мы проводим моделирование осциллирующего магнитоплазменного слоя, который частично заполнен ускоренными электронами. Исследуется микроволновый наблюдательный отклик на симметричную (сосисочную) быструю магнитозвуковую (БМЗ) волну в слое. Моделирование проводится в рамках аналитического решения системы линеаризованных МГД уравнений.

Получена нелинейная зависимость интенсивности микроволнового излучения от параметров слоя, возмущаемого симметричной БМЗ волной. В случае узких ГС источников (с поперечным размером, существенно меньшим масштаба неоднородности плотности тепловой плазмы) глубина модуляции микроволнового излучения превосходит относительную амплитуду модулирующей БМЗ волны и, наоборот, становится меньше амплитуды волны в случае широких ГС источников. Показано, что контраст глубины модуляции излучения узких и широких источников растёт с повышением контраста плотностей в слое и вне его. Найдено, что при определённых сочетаниях ширины ГС источника и угла зрения, происходит удвоение частоты осцилляций микроволнового излучения. Анализируется диагностический потенциал данного эффекта для оценок поперечных размеров ГС источников.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-12-00195. Работа Кальтман Т.И. поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 18-29-21016 мк).

МЕДЛЕННЫЕ МАГНИТОЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ В ГОРЯЧИХ КОРОНАЛЬНЫХ ПЕТЛЯХ

Офман, Л.; Ванг, Т. Я.

НАСА Центр Космических Полетов Годдарда и Католический Университет Америки, Гринбелт, Мэриленд, США, ofman@cua.edu

Медленные магнитозвуковые волны при солнечных вспышках наблюдались в горячих ($T \geq 6$ МК) корональных петлях при помощи космических телескопов SOHO/SUMER, SDO/AIA в различных диапазонах волн EUV а также и других инструментов [1]. Недавно, использовав наблюдения и модели МГД было обнаружено, что в таких петлях теплопроводность плазмы подавляется, а вязкость сжатия увеличивается [2,3]. В этом докладе мы представляем результаты трехмерного МГД моделирования возбуждение и затухание медленных магнитозвуковых волн в горячих корональных петлях с реалистичной магнитной геометрией, повышенной плотностью и температурой по сравнению с фоновой короной. Физические параметры МГД модели заданы на основе наблюдений солнечной короны в крайнем ультрафиолетовом диапазоне. Влияние компонентов тензора вязкости сжатия вдоль магнитного поля впервые включено в трёхмерной МГД модели корональной петли используя классические и увеличенные значения коэффициента вязкости. Волны возбуждаются импульсом скорости в основе петли на нижней границе короны, моделируя эффект вспышек. Результаты моделирования показывают распространение и отражение медленной магнитозвуковой волны в петле, а также нелинейное возбуждение быстрых магнитозвуковых волн. Модель также показывает значительную утечку волн из корональных петель с небольшим эффектом вязкости в менее горячих (6 МК) петлях и более значительные эффекты вязкой диссипации в более горячих (10,5 МК) корональных петлях. В итоге, трехмерная МГД-модель показывает возбуждение и образования стоячих магнитозвуковых волн в горячих корональных петлях, нелинейные взаимодействия волн, затухания волн, волн и вязкой диссипации волн. Результаты нашей модели могут использоваться для улучшения корональной сейсмологии [4].

[1] Wang, T.J., Ofman, L., Yuan, D., Reale, F., Kolotkov, D.Y., Srivastava, A.K., "Slow-Mode Magnetoacoustic Waves in Coronal Loops", 2021, *Space Sci. Rev*., 217, 34. DOI: 10.1007/s11214-021-00811-0

[2] Wang, T.J., Ofman, L., Sun, X., Solanki, S.K. & Davila, J.M., Effect of Transport Coefficients on Excitation of Flare-induced Standing Slow-mode Waves in Coronal Loops, *ApJ*, 860, 107, 2018. DOI: 10.3847/1538-4357/aac38a

[3] Wang, T.J., and Ofman, L., Determination of transport coefficients by coronal seismology of flare-induced slow-mode waves: Numerical parametric study of 1D loop model, *ApJ*, 886, 2, 2019. DOI: 10.3847/1538-4357/ab478f

[4] Ofman, L. & Wang, T.J., Excitation and damping of slow magntosonic waves in flaring coronal loops: Effects of compressive viscosity, 2022, *ApJ*, in Press; arXiv:2111.10696

ПЕРВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ 3-МИН ПЯТЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ НА СИБИРСКОМ РАДИОГЕЛИОГРАФЕ В ДИАПАЗОНЕ ЧАСТОТ 3-6 ГГЦ

Сыч Р.А., Алтынцев А.Т., Кузнецов А.А.

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

Мы представляем первые наблюдения колебаний радиоизлучения пятенной активной области NOAA 12833, полученные с использованием данных Сибирского Радио Гелиографа (СРГ) 19 июня 2021 года на частотах 2.8, 3.1, 3.4, 3.9, 4.7 и 5.6 ГГц, и данных обсерватории SDO/AIA на волне 304А. Данные СРГ уникальны тем, что обеспечивают прямые измерения вариаций интенсивности и поляризации излучения в переходной области и короне над солнечным пятном с высоким временным и пространственным разрешением. Для всех длин волн получены изображения источников совместно с корреляционными кривыми. Источники микроволнового излучения пятна на разных длинах волн близки к области фотосферного магнитного поля, в котором частота 3-й циклотронной гармоники превышает соответствующую частоту регистрации излучения. Был выполнен спектральный анализ корреляционных кривых с использованием Вейвлет анализа для получения мощностных и фазовых спектров колебаний. Показано существование осцилляций микроволнового излучения с периодами порядка 3, 5 и 13 минут. Полученная зависимость мощности колебаний от частоты генерации радиоизлучения показала преобладание 3-мин периодов на высоких частотах 4.7 ГГц и 5.6 ГГц. В то же время 5-ти и 13-ти минутная периодичность присутствует на низких частотах вблизи 2.8 ГГц. В поляризованном излучении преобладают 3-мин колебания. Коэффициенты кросс-корреляции между микроволновыми кривыми и профилем интенсивности 304А находятся в диапазоне 0.4-0.74 и увеличиваются с ростом частоты. Временные задержки между ними не превышают нескольких секунд. Мы предполагаем, что полученная зависимость периода колебаний от частоты радиоизлучения связана с эффектом наблюдения различных магнитных структур активной области с разной частотой отсечки распространяющихся волн. Авторы благодарят Лесового С.В. и команду СРГ за предоставленные данные наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-12-00195.

О ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ ВЗАИМОСВЯЗИ МИКРОВОЛНОВЫХ ИСТОЧНИКОВ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК И ВСПЛЕСКОВ В ДЕЦИМЕТРОВОМ И МЕТРОВОМ РАДИОДИАПАЗОНАХ

Кашапова Л.К., Куприянова Е.Г., Колотков Д.Ю., Рид Х.А.С., Кудрявцева А.В., Тан Ч.М

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

Одним из самых распространённых сценариев, объясняющих взаимосвязь между-микроволновым излучением солнечных вспышек и всплесками в метровом и дециметровом диапазонах основан на генерации ускоренных электронов в солнечной атмосфере. Таким образом рассматривается распространение двух потоков ускоренных электронов, принадлежащих одной популяции. С появлением новых наблюдательных данных, возникает вопрос – насколько часто реализуется именно такой сценарий.

Мы представляем другие возможные сценарии, объясняющие взаимосвязь между микроволновым излучением и всплесками в дециметровом и метровом диапазонах — например, генерацию ускоренных электронов за счет взаимодействия МГД-осциллирующей вспышечной петли с внешними плазменными структурами. В работе использованы наблюдения новейших инструментов, таких как Сибирский радиогелиограф 48 (СРГ48), LOw Frequency ARray (LOFAR) и Mingantu Spectral Radioheliograph (MUSER), а также многоволновые данные других инструментов. Сопоставляются эмпирические сценарии, полученные для этих событий, и обсуждается роль различных процессов в высвобождении и распространении энергии в солнечных вспышках.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Лондонского Королевского Общества 21-52-10012 КО-а.

ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ВЕЙБЕЛЕВСКОГО ТИПА В МОДЕЛИ КОРОНАЛЬНОЙ АРКИ С АНИЗОТРОПНЫМ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПО СКОРОСТЯМ

Кочаровский Вл.В.[1], **Гарасёв М.А.**[1], **Емельянов Н.А.**[1], **Нечаев А.А.**[1], **Кочаровский В.В.**[1, 2]

[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*

Доклад посвящён исследованию инкремента электронной неустойчивости вейбелевского типа в однородной бесстолкновительной бимаксвелловской плазме с анизотропной двухтемпературной функцией распределения электронов по скоростям при наличии внешнего магнитного поля. Как известно, это поле при не слишком большой напряженности (ограниченной величиной, зависящей от концентрации, средней температуры и анизотропии плазмы) подавляет, но не исключает развитие вейбелевской неустойчивости. Последняя ведёт к образованию токовых слоёв и филаментов, а в дальнейшем – к формированию квазимагнитостатической турбулентности неравновесной плазмы и последующему перезамыканию силовых линий созданного неоднородного магнитного поля.

В интересующих нас условиях солнечных или звёздных корональных арок подобный процесс может привести к деформации и частичному разрушению их магнитного поля, а следовательно, к выбросу плазмы, если по каким-либо причинам в арках возникнет достаточно высокая степень электронной анизотропии, для которой магнитное поле насыщения вейбелевской неустойчивости будет больше или порядка магнитного поля арок.

Имея в виду характерные параметры такого рода задачи, мы провели качественный и количественный анализ зависимости инкремента, оптимальных волновых чисел и насыщающего поля неустойчивости вейбелевского типа от ориентации и величины внешнего однородного магнитного поля, концентрации и средней температуры плазмы, ориентации оси и степени анизотропии распределения электронов по скоростям. Результаты сопоставлены с известными ранее для ряда частных случаев рассматриваемой неустойчивости плазмы.

Наиболее предпочтительной для развития неустойчивости представляется ориентация внешнего магнитного поля вдоль оси анизотропии электронов, а ориентация волнового вектора неустойчивых мод – поперёк этой оси. Указанный случай рассмотрен в докладе особенно детально. В результате определены необходимые параметры плазмы, электронной анизотропии и магнитного поля корональных арок, для которых неустойчивость вейбелевского типа может эффективно развиваться. Найдены также её характерные пространственно-временные масштабы, установлены ожидаемые структуры возникающих квазимагнитостатических полей, даны оценки их типичных величин и предложены возможные сценарии явления перезамыкания магнитных силовых линий на различных масштабах, допускающих существенную реструктуризацию арочного магнитного поля.

Качественный анализ полученных результатов и их интерпретация для типичных условий корональных арок выполнены при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-21029 мк).

ВАРИАЦИЯ ЗАВИСИМОСТИ МЕЖДУ ИНТЕНСИВНОСТЯМИ РЕНТГЕНОВСКИХ ВСПЫШЕК И СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ С ЦИКЛАМИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Очелков Ю.П.

ИПГ, РОСГИДРОМЕТ, г. Москва, Россия, yur_och@mail.ru

На основе изучения двумерных распределений солнечных вспышек по пиковым интенсивностям мягкого рентгеновского излучения и протонных событий (СПС) сделан вывод о том, что пиковая интенсивность СПС изменяется не только с гелиодолготой, но и с циклом солнечной активности (СА). Использованы данные КА GOES по рентгеновским вспышкам в диапазоне длин волн 0.1-0.8 нм и данные по наблюдениям СПС с пороговыми энергиями протонов в 30 МэВ. Было обнаружено, что имеет место значительное изменение (при одинаковом значении пиковой интенсивности рентгеновского излучения) пиковой интенсивности СПС (вплоть до порядка величины) в зависимости от цикла СА для области гелиодолгот, где отсутствует гелиодолготное ослабление пиковой интенсивности СПС (0^0-90^0W) и, что изменение с циклом отсутствует для гелиодолгот ,где имеется гелиодолготное ослабление пиковой интенсивности СПС (0^0-30^0E , 30^0E-90^0E). На рисунке 1 приведены зависимости для W(Jx,Jp)=$N(J_x, J_p)/N(J_x, 0)$ (где $N(J_x, J_p)$ – интегральные двумерные распределения по пиковой интенсивности Jp и Jx для СПС и рентгеновских вспышек для 23 и 22 циклов. Из рисунка 1 следует, что W(Jx,0.3) для 22 цикла совпадает с W(Jx,3) для 23 цикла для гелиодолгот 0^0-90^0W (Jp в част/см2ср). Зависимость пиковой интенсивности событий СПС от цикла СА объясняет обнаруженную ранее (см. [1]) зависимость гелиодолготного ослабления пиковой интенсивности СПС от цикла СА. Найденные закономерности не могут быть объяснены изменением характеристик солнечных вспышек с циклом СА и изменением условий гелиодолготного распространения протонов в корональных полях с циклом СА, а связаны, скорее всего, с особенностями выхода солнечных протонов в область свободного распространения, важнейшую роль в котором играют корональные выбросы массы, характеристики которых зависят от цикла солнечной активности.

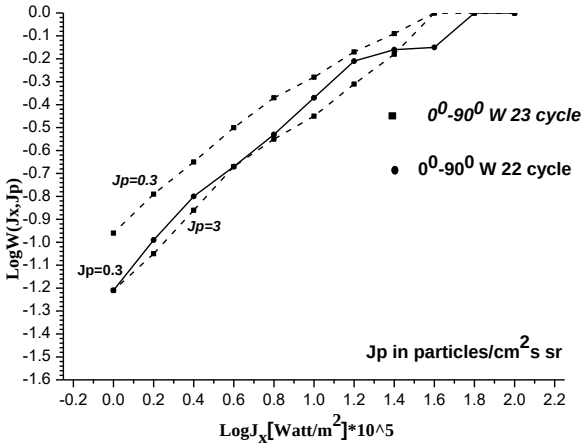


Рис1. Зависимость W(Jx,Jp) от Jx для 22 (сплошная линия) и 23 (пунктир) циклов.

1.Очелков Ю.П. Изменение гелиодолготной зависимости пиковых интенсивностей солнечных протонных событий с солнечными циклами. Изв.РАН, серия физ., 2019, т.83, №5, с.590-593

ОСОБЕННОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ВОЛОКОН ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В ЛИНИЯХ H_alpha и He II 304 Å

Смирнова В.В., Цап Ю.Т., Jelínek P., Karlický M.

КрАО РАН, пгт. Научный, Россия, vvsvid.smirnova@yandex.ru

Солнечные волокна представляют собой темные и плотные образования, видимые на диске, преимущественно в линии H_alpha. Волокна имеют сложную структуру, состоящую из множества отдельных магнитных нитей, заполненных плотной и холодной плазмой.

На основе статистических исследований в работе проводится сравнение распределений интенсивности излучения солнечных волокон по данным в линиях H_alpha и He II 304 Å. Обсуждается морфология и механизм формирования солнечных волокон и протуберанцев.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Чешского научного фонда в рамках научного проекта № 20-52-26006.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ДИПОЛЬНОГО МОМЕНТА АНТИ-ХЕЙЛОВСКОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ

Старкова Л.И.

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

Магнитные моменты активных областей Солнца имеют предпочтительную ориентацию в солнечном цикле. Активные области с моментами, ориентированными противоположным образом (анти-Хейловские), появляются редко и преимущественно в периоды окончания текущего солнечного цикла. Причина появления таких анти-Хейловских областей остаётся предметом обсуждения.

Возможным направлением изучения анти-Хейловских активных областей является сравнение эволюционных изменений магнитных свойств с типичными активными областями. С этой целью были взяты соответствующие активные области NOAA 978 и NOAA 7912. Изучали ориентацию дипольного момента и угловую протяжённость этого момента. Оказалось, что изменение углового размера дипольного момента у обеих изучаемых областей совпадало по характеру изменению и количественным показателям. Вариация ориентации дипольного момента у обеих областей носила колебательный характер, не проявляя какой-либо временной закономерности. Установленные общие закономерности изменения дипольных моментов означает, что анти-Хейловские активные области появляются вследствие естественных флуктуаций.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ТОКИ, ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ И МГД РАВНОВЕСИЕ МАГНИТНЫХ ЖГУТОВ

Цап Ю.Т., Копылова Ю.Г.

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

Довольно часто для описания тех или иных МГД явлений в магнитных трубках (жгутах) атмосферы Солнца используется приближение резкой границы плазма-плазма, что существенно упрощает проведение анализа. В частности, такой подход используется для экранированных токовых жгутов, когда азимутальная компонента магнитного поля во внешней области принимается равной нулю, а значит, продольный электрический ток считается сконцентрированным внутри трубки. Однако такие представления, если считать электрическую проводимость плазмы конечной, противоречат условию непрерывности тангенциальной компоненты электрического поля на граничной поверхности жгута.

Проведенный нами анализ показал, что данная проблема может быть решена, если принять во внимание существенную разницу в проводимости идеальной плазмы на внешней и внутренней границе. Это предполагает более высокую по сравнению с окружающей короной температуру плазмы внутри токовых жгутов. Обращено также внимание на важность корректного описания условий МГД равновесия в области границы, что, в противном случае, может приводить к тяжелым парадоксам. В свете современных наблюдений обсуждены следствия полученных результатов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки (НИР № 0831-2019-0006) и гранта РФФИ_Чехия в рамках научного проекта № 20-52-26006.

ДЕСТАБИЛИЗАЦИЯ ВОЛОКОН В АКТИВНЫХ ОБЛАСТЯХ И СВЯЗЬ СО ВСПЫШКАМИ И КВМ

Якунина Г.В.

ГАИШ МГУ, г. Москва, Россия, yakunina45@yandex.ru

Рассмотрена связь активных волокон со вспышками и КВМ. Современные наблюдения обнаружили, что когда волокно разрывает магнитные силовые линии, связывающие его с фотосферой, оно не просто покидает Солнце, но может быть блокировано другими магнитными структурами после его подъема на некоторую высоту, а затем вернуться назад к Солнцу. Взаимодействие между всплывающими мелкомасштабными магнитными структурами, существующими ранее, структурами крупных масштабов и последующая перестройка магнитного поля, по-видимому, является одной из причин солнечной активности. Использовались наблюдения, полученные с Hα фильтром в ВЭ ГАИШ, и данные из научных публикаций.

Наши результаты показывают, что физической связью между эволюцией вспышек и КВМ является магнитное пересоединение. Поведение протяженных долгоживущих волокон исследовалось на основе наблюдений с Hα фильтром в ВЭ ГАИШ. Участок волокна, прилегающий к месту возникновения вспышки, дестабилизируется. Наблюдаются доплеровские скорости до сотен км/с. Остальная часть волокна может оставаться спокойной. Иногда активизация волокна наблюдается до и после вспышки. Рассмотрены различные типы активизации волокон и их связь со вспышками и КВМ, Активизация волокон коррелирует с быстро возникающим магнитным потоком, что приводит к дестабилизации и выбросу волокна.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ В КОРОНЕ СОЛНЦА

Е.В Жужома, В.С. Медведев

НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия, zhuzhoma@mail.ru

Топологический анализ солнечных магнитных полей зарекомендовал себя как ценный инструмент для предсказания наиболее благоприятных мест развития магнитного пересоединения и возникающих в результате него солнечных вспышек [1]. В частности, было показано, что существуют такие конфигурации источников (например, на поверхности фотосферы), при которых их малое смещение приводит к зарождению и быстрому перемещению в пространстве дополнительной нулевой точки высоко над плоскостью источников (т.е., в короне), что создает возможность быстрого развития магнитного пересоединения в больших областях пространства. Это явление получило название “топологического триггера” [2]. В последние годы, с использованием спутниковых данных с высоким пространственным разрешением, были найдены конкретные примеры хромосферных микровспышек, развивающихся по механизму топологического триггера [3].

К сожалению, использовавшиеся в вышеупомянутых работах топологические индексы в формуле Эйлера-Пуанкаре могут быть эффективно применены лишь в системах с небольшим числом источников. (Фактически, почти все содержательные результаты были получены для конфигураций с четырьмя магнитными полюсами.) В докладе будут представлены и проиллюстрированы несколько общих теорем, связывающих количество и тип магнитных полюсов с количеством и типом возникающих в таком поле нулевых точек для магнитного поля, создаваемого произвольным числом источников [4].

Работа выполнена при финансовой поддержке лаборатории динамических систем и приложений НИУ ВШЭ, грант Министерства науки и высшего образования РФ, соглашение № 075-15-2019-1931.

Литература:

1. A.V. Oreshina, I.V. Oreshina, B.V. Somov. Astron. & Astrophys., v.538, p.A138 (2012).
2. В.С. Горбачев, С.Р. Кельнер, Б.В. Сомов, А.С. Шварц. Астрон. журн., т.65, с.601 (1988).
3. Yu V. Dumin, B.V. Somov. Res. Not. Amer. Astron. Soc., v.1, p.15 (2017).
4. E.V. Zhuzhoma, V.S. Medvedev, Yu.V. Dumin, B.V. Somov. Preprint arXiv:2111.06730 (2021).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЦА НА СИБИРСКОМ РАДИОГЕЛИОГРАФЕ И РАДИОТЕЛЕСКОПЕ РАТАН-600

Феденёв В.В., **Анфиногентов С.А.**

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия, fedenev@iszf.irk.ru

В последние несколько лет на базе Института солнечно-земной физики СО РАН ведётся постройка Сибирского Радиогелиографа (СРГ) – радиоинтерферометра, состоящего из трёх антенных решёток и наблюдающего Солнце на нескольких частотах микроволнового диапазона. Первая решётка работает в диапазоне частот от 3 до 6 ГГц, вторая - от 6 до 12 ГГц и третья - от 12 до 24 ГГц. В 2021 году проводились тестовые наблюдения на решётке 3-6 ГГц, а с декабря того же года проводятся регулярные наблюдения в диапазоне 6-12 ГГц (вторая решётка).

Задача данной работы заключается в тестировании алгоритмов синтеза и калибровки радиоизображений СРГ путём сравнения с модельными данными и данными реальных наблюдений, полученных другими инструментами, в частности радиотелескопом РАТАН-600, работающим в том же частотном диапазоне. Расписание наблюдений последнего перекрывается с периодом наблюдений СРГ, что позволяет проводить прямое сравнение одновременных наблюдений Солнца.

В рамках данной работы был произведён сравнительный анализ одновременных наблюдений полного диска Солнца, в том числе анализ таких параметров как пространственное расположение радиоисточников, интегральный поток радиоизлучения, а также спектры радиоисточников и спокойного Солнца. Показано, что наблюдательные данные двух инструментов хорошо согласуются друг с другом. Кроме того, полученные результаты позволили выявить особенности обоих инструментов и улучшить алгоритмы синтеза радиоизображений СРГ.

Работа поддержана грантом РНФ 21-12-00195.

МИКРОВОЛНОВЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОВ, СВЯЗАННЫХ С ГОРЯЧИМИ СТРУЯМИ, ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАТАН-600

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

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

В докладе представлены данные радионаблюдений солнечных активных областей, связанных с инициацией и эволюцией плазменных струй. Исследование проведено на базе «Каталога горячих плазменных струй в короне Солнца» (https://solar.sao.ru/coronal-jets-catalog/), для событий, совпадающих по времени с наблюдениями РАТАН-600. Основное внимание сосредоточено на крупномасштабных "горячих" струях в сильных магнитных полях активных областей, что позволяет использовать потенциал наблюдений в радиодиапазоне, с его относительно низким пространственным разрешением, но при этом уникальной информацией об электронной температуре и величине магнитного поля.

Для отождествления струй использована визуализация динамики по временным сериям КУФ-изображений (SDO/AIA) в разных спектральных линиях, с наложением отдельных кадров на сканы РАТАН-600. Визуализация струй также совмещена с изображениями силовых линий коронального магнитного поля, реконструированного в приближении нелинейного бессилового поля (NLFFF) по фотосферным магнитограммам, полученным SDO/HMI. В некоторых случаях наблюдательные данные дополнены расчетами радиоизлучения, что позволяет оценить верность реконструкции магнитных конфигураций активных областей в короне. Определение магнитных конфигураций, в которых появляются плазменные струи, а также оценки магнитного поля важны для развития моделей генерации и стабилизации корональных струй. Вблизи солнечных активных областей плазменные струи направляются сильными магнитными полями. Величина магнитного поля в активной области дополнительно оценивалась по спектрам микроволнового излучения.

Кроме всплесков III-го типа, часто сопровождающих КУФ-струи, а также «диммингов» (наблюдавшихся на СРГ при временном перекрытии струей пятенных источников) данные радионаблюдений могут быть полезны для отслеживания сопутствующей струям динамики состояния плазмы активной области. Так как радиоизлучение чувствительно к изменению структуры сильного магнитного поля, модельные расчеты и данные радионаблюдений указывают на изменения интенсивности и поляризации радиоизлучения, связанные, например, с выходом магнитного потока. Кроме того, регистрируются отклики на изменения плотности и температуры плазмы активной области в течение процессов, сопровождающих эволюцию струи. Согласно наблюдениям на РАТАН-600 в диапазоне 3-18 ГГц, в некоторых случаях (например, АО 12738 за 2019/04/17 и АО 12681 за 2017/09/23) эволюция крупной струи внутри активной области вызывает кратковременное уярчение радиоизлучения. Также в наблюдениях иногда регистрируются дополнительные источники, связанные со струями и не отображающиеся при расчетах на основе реконструированных магнитных полей. Так, в АО 12419 (2015.09.18) в месте инициации струи по наблюдениям на РАТАН-600 обнаружен узкий (6-8 угл сек) тормозной источник, который интерпретирован как след от испарения и последующего остывания хромосферной плазмы после инициации струи.

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

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ СОЛНЦА ПЕРЕД ВСПЫШКАМИ

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

[1]*ГАО РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, beam@gaoran.ru*
[2]*НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

Представлено исследование пространственного распределения квазипериодических колебаний микроволнового излучения в двух активных областях перед вспышками рентгеновского класса M по GOES. Рассмотрены два случая: NOAA 11283 и NOAA 11302, 6 и 25 сентября 2011 г. соответственно. В работе были использовали ежедневные наблюдения на радиогелиографе Nobeyama на волне 1.76 см. В обоих случаях обнаружены предвспышечные цуги квазипериодических колебаний длительностью около 3-4 импульсов. При этом колебания локализуются в компактной зоне активной области, которая совпадает с местом максимальной яркости во время вспышки.

ЭВОЛЮЦИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЕЛИОЦЕНТРИЧЕСКОГО РАССТОЯНИЯ ПО ДАННЫМ PARKER SOLAR PROBE И ДРУГИХ МИССИЙ

Хабарова О.В.[1], Анциферова У.П.[2]

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

[2] *НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия*

Для построения теоретических моделей солнечного ветра и его структур необходимо знать поведение основных параметров плазмы в пространстве и времени. Эти характеристики доступны с хорошей точностью только из in situ наблюдений космических аппаратов. В литературе есть очень ограниченное количество работ, в которых анализировалась радиальная эволюция магнитного поля, скорости, плотности и температуры солнечного ветра. Ранее для этих целей использовались данные аппаратов, выполнявших свои миссии в 70-х годах. При этом ни один из них не приближался к Солнцу ближе, чем на ~0,3 астрономические единицы. Доступная на тот момент информация не позволяла описать процессы, происходящие вблизи солнечной короны. Запуск миссии Parker Solar Probe, подлетающей к Солнцу рекордно близко, открыл широкие возможности для изучения солнечного ветра, начиная с расстояний порядка Альфвеновского радиуса. На данный момент доступны данные Parker Solar Probe с приближением к Солнцу до 0.08 а.е.
Проведен анализ данных, полученных с Parker Solar Probe и Helios 2 - до 1 а.е., и с IMP8 и Voyager 1 - начиная с орбиты Земли и до 7 а.е. Выявлены зависимости межпланетного магнитного поля, температуры, скорости и плотности солнечного ветра от гелиоцентрического расстояния, проанализированы их типичные профили. Обсуждается природа отклонений наблюдаемых величин от теоретических ожиданий. Особое внимание уделяется сравнению результатов миссий Parker Solar Probe и Helios.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПОТОКОВ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Кислов Р.А.[1,2], Кузнецов В.Д.[2]

[1] *ИКИ РАН, Москва, Россия*
[2]*ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия*

Высокоскоростные потоки из корональных дыр часто рассматриваются как спиральные магнитоплазменные структуры, коротирующие с источником на Солнце. При этом остаётся не полностью решённым вопрос о том, каким образом формируется спиральная структура в пространстве и каким образом поддерживается коротация. Согласно многочисленным наблюдательным данным (например, STEREO A, STEREO B), вдали от Солнца угловая скорость вращения спирали на 1-2 порядка превышает угловую скорость составляющей её плазмы. Это указывает на то, что спираль в каждый момент времени состоит из разных частиц (т.е. не является материальным объектом), а её движение представляет собой коллективный процесс наподобие распространения спиральных волн плотности в галактиках. Мы исследовали распространение высокоскоростного потока из корональной дыры в кинематическом и в МГД-приближении. Показано, что радиально направленные струи вещества из корональной дыры формируют спиральные волны плотности, скорости солнечного ветра и магнитного поля. Для каждой величины форма спиралей может немного отличаться и не полностью совпадать со спиралью Паркера. Спираль коротирует с источником на Солнце и в каждый момент времени состоит из различных частиц.

ВЛИЯНИЕ ПОЛЯРНЫХ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР НА СКОРОСТЬ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Богачёв С.А.[1,2], Борисенко А.В.[2]

[1]ИКИ РАН, г. Москва, Россия, bogachev.sergey@gmail.com, [2]ФИАН, г. Москва, Россия

Корональные дыры (КД) -- это протяженные темные области в солнечной атмосфере, которые характеризуются дефицитом излучения в крайнем ультрафиолетовом, рентгеновском и микроволновом диапазонах. Относительно невозмущенной короны, КД имеют пониженную температуру и плотность плазмы. Магнитное поле в КД состоит преимущественно из незамкнутых линий, расширяющихся в межпланетное пространство.

Впервые корональные дыры были описаны 50-е годы XX века известным швейцарским астрономом Максом Вальдмайером [1-2], который обнаружил на полученных с помощью коронографа изображениях солнечной короны в зеленой оптической линии 5303 А области пониженной яркости большой площади. Существенный прогресс в исследованиях КД связан с началом космической эры, когда стали возможными внеатмосферные наблюдения Солнца в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах длин волн. В частности, в 70-е годы XX века большой объём новых данных по КД был получен в рамках научной программы орбитальной обсерватории SkyLab, а также с поверхности Земли в инфракрасной линии He_I 10830 А в обсерватории Китт-Пик, США (например, [3]).

В данной работе мы использовали данные SDO/AIA 193 А и ACE/SWEPAM за 2019 год, чтобы сравнить влияние полярных и экваториальных корональных дыр (КД) на характеристики солнечного ветра (СВ) в условиях низкой солнечной активности. Как и следовало ожидать, большинство геомагнитных бурь в этот период были вызваны высокоскоростными потоками солнечного ветра (>500-600 км/с), происходящими из экваториальных корональных дыр (ЭКД).

Вместе с тем, показано, что в глубоком минимуме солнечной активности заметное влияние на характеристики СВ на орбите Земли могут оказывать полярные КД. Для интегральной площади полярных КД и скорости СВ в исследованный период обнаружена корреляция с коэффициентом 0.6. Особенно существенное влияние на скорость СВ оказывала южная полярная КД, для которой весной 2019 года (в период максимального наклона к Земле южного полюса Солнца) найдена корреляция со скоростью СВ с коэффициентом 0.82. Северная полярная КД почти не влияла на скорость СВ. Осенью 2019 года, в период наклона к Земле северного полюса Солнца, обнаружена антикорреляция площади полярных КД со скоростью СВ на земной орбите. Мы обсуждаем возможный механизм влияния полярных КД на характеристики СВ, а также предлагаем интерпретацию полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 21-72-10157.

1. Waldmeier M. // Z. Astrophys. 1956. V. **38**. P. 219.
2. Waldmeier M. // Die Sonnenkorona. Birkhauser. Basel. 1957. V. **2**.
3. Zirker, J. B. // (ed.) 1977, Coronal Holes and High-speed Wind Streams, Colorado Assoc. Univ. Press, Boulder

УРОВЕНЬ МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА СПАДЕ 24 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Лукманов В.Р.

Физический институт им.П.Н.Лебедева РАН, lukmanov@prao.ru

Представлены результаты длительной (2015-2019 гг.) серии наблюдений межпланетных мерцаний, выполненной на радиотелескопе БСА ФИАН на частоте 111 МГц. Анализируются радиальные зависимости относительного уровня (индекса) межпланетных мерцаний радиоисточника 3С 48, луч зрения на который в течение года смещается от низких до средних и высоких гелиоширот. Показано, что для всех годичных серий радиальная зависимость индекса мерцаний оказывается более пологой, чем ожидается для модели сферически симметричной среды. Отличие объясняется широтным эффектом с учетом влияния приэкваториального слоя с повышенной плотностью плазмы. Моделирование низкоширотного слоя показывает, что толщина слоя на фазе спада солнечной активности в среднем два раза больше, чем вблизи минимума активности.

К ВОПРОСУ МИНИМАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ, НЕОБХОДИМОЙ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Тимофеев В.Е.

Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения Российской академии наук

vetimofeev@ikfia.ysn.ru

В работе рассматривается наиболее изученный вид солнечной активности – изменение числа солнечных пятен, а именно числа Вольфа W. Плотность корпускулярной энергии Солнца P, выделяемой в форме энергии солнечного ветра, будет определяться суммой его тепловой и кинетической энергии:

$$P = nkT + m_p nv^2/2,$$

где m_p, n, v и T – соответственно масса, концентрация, скорость и температура протонов в солнечном ветре на орбите Земли, k – постоянная Больцмана. Первый член суммы – это термодинамическое давление солнечного ветра, второй – плотность его кинетической энергии. Плотность магнитной энергии Солнца E на орбите Земли можно оценить по данным величины B модуля ММП:

$$E = B^2 / 8\pi .$$

Показано, что прямой зависимости плотности корпускулярной энергии P от числа солнечных пятен W практически нет. Более того, 11-летние вариации P составляют в среднем всего ≈15% и по фазе не совпадают с вариациями W (чисел Вольфа). В основном, эта энергия обусловлена не образованием солнечных пятен, а энергией расширения солнечной короны и общим истечением солнечной плазмы. В то же время 11-летние вариации модуля ММП значительно лучше совпадают по фазе с вариациями W и имеют гораздо большую амплитуду – в среднем 53%. Вместе с тем достаточно ярко проявляется синхронность временного хода плотности магнитной энергии E и числа солнечных пятен W. Отсюда следует, что функциональная зависимость в основном проявляется только между числами Вольфа и модулем ММП.

Величина отношения $\Delta E/\Delta W$ в среднем на орбите Земли будет равна (0.677±0.321) (эВ/см^3) / (ед. числа Вольфа). На поверхности Солнца с учетом квадрата расстояний этот коэффициент будет равен $(3.39\pm1.61)\cdot10^4$ (эВ/см3) / (ед. W), т. е. одна единица чисел Вольфа эквивалентна выделению энергии $3.39\cdot10^4$ эВ/см^3.

Это относительно малая плотность энергии равна всего $\approx 5.4\cdot10^{-8}$ эрг/см^3 ($3.39\cdot10^4$ эВ/см^3), но она может заметно повлиять на запуск процессов образования пятен. Таким образом, любой внешний процесс, который выделит в недрах Солнца в области образования пятен такую порцию энергии, может повлиять на солнечную активность на единицу числа Вольфа.

Работа была выполнена в рамках проекта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №АААА-А21-121011890014-0

ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ГЕЛИЯ В МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПРОЯВЛЕНИЯХ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА РАЗНЫХ МАСШТАБАХ

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

Институт космических исследований (ИКИ) РАН, Москва, Россия, aleks.xaa@yandex.ru

Одним из важных параметров состояния плазмы солнечного ветра является относительное содержание дважды ионизированных ионов гелия, которое может существенно различаться в некоторых крупномасштабных структурах солнечного ветра, а также динамически изменяться в результате локальных процессов в плазме. Известно, что в межпланетных корональных выбросах массы (ICME) в среднем наблюдается повышенное содержание гелия, однако детали и причины этого явления пока недостаточно изучены.

В данной работе исследуется крупно- и среднемасштабная динамика относительного содержания гелия в ICME, а также анализируются ее зависимости от ряда параметров плазмы солнечного ветра и межпланетного магнитного поля. Крупномасштабная динамика ($>10^6$ км) исследовалась на основе среднечасовых значений параметров плазмы и межпланетного магнитного поля из базы данных OMNI-2, а для анализа среднемасштабной динамики (10^4-10^5 км) использовались 3 секундные данные спутника WIND. Для селекции по типу потока солнечного ветра использовался каталог крупномасштабных явлений ИКИ РАН http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/ [Ермолаев и др., 2009]. Показано, что на больших масштабах содержание гелия в среднем увеличивается при уменьшении плазменного параметра β в ICME. Эта зависимость связана, прежде всего, с ростом содержания гелия при увеличении магнитного давления. При этом в магнитных облаках наблюдается слабая отрицательная корреляция содержания гелия с тепловым давлением, а в EJECTA – слабая положительная. Полученные результаты подтверждают выдвинутое ранее предположение о существовании обогащенного ионами гелия электрического тока внутри ICME [Yermolaev et al., 2020]. На средних масштабах внутри ICME сохраняется тенденция антикорреляции относительного содержания гелия с β, однако локально зависимости содержания гелия от параметров плазмы и магнитного поля могут динамически значительно изменяться. Например, может наблюдаться множество структур меньших масштабов с положительной корреляцией содержания гелия и величины магнитного поля, которые чередуются с областями отрицательной корреляции.

1. *Ермолаев Ю. И. и др.* Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976-2000 гг. // Космические Исследования. 2009. Т. 47. № 2. С. 99-113.

2. *Yermolaev Y.I. et al.* Dynamics of large-scale solar-wind streams obtained by the double superposed epoch analysis. 4. Helium abundance // Journal of Geophysical Research. 2020. V. 125. № 7. DOI: 10.1029/2020JA027878

УСКОРЕНИЕ ПЛАНЕТНЫХ ИОНОВ В АНОМАЛИИ ГОРЯЧЕГО ПОТОКА У ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ МАРСА

Шувалов С.Д., Ким К.И., Вайсберг О.Л.

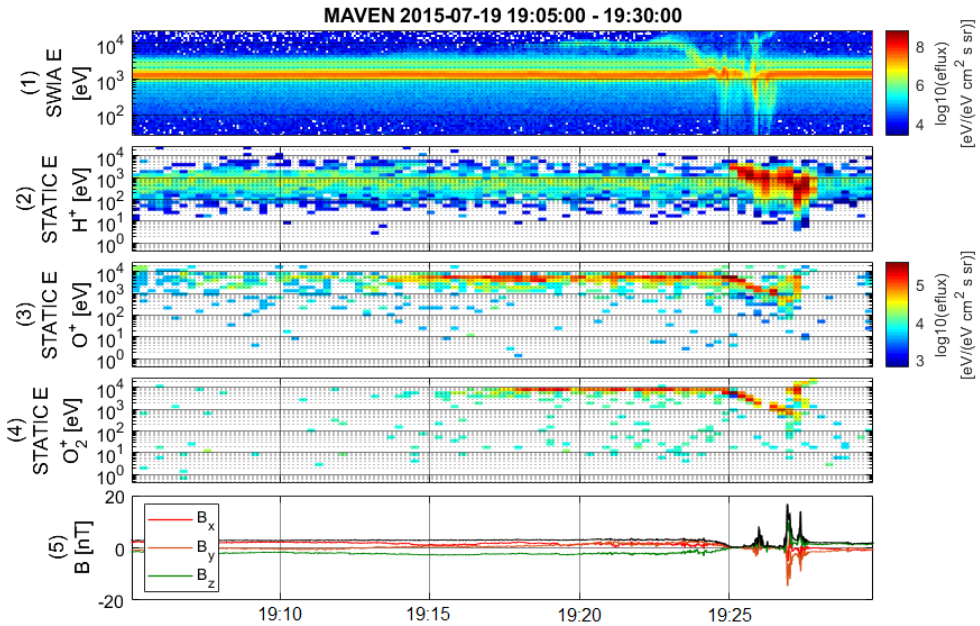
ИКИ РАН, г. Москва, Россия, shuvalovsergei@gmail.com

Аномалии Горячего Потока (АГП) являются одним из самых известных типов форшок-транзиентов – событий, образующихся перед головными ударными волнами планет. Они представляют собой поток разогретой плазмы, направленный от ударной волны в месте её пересечения с межпланетным токовым слоем. Наблюдения АГП у Земли спутниковой группировкой MMS показали, что при определенных условиях в них может происходить ускорение частиц солнечного ветра с единиц кэВ до почти МэВ посредством механизма ускорения Ферми I рода. Это позволяет предположить важную роль АГП в формировании космических лучей на астрофизических ударных волнах во всем космическом пространстве [1].

В данном докладе представлен анализ АГП у Марса, зарегистрированной космическим аппаратом MAVEN, из списка, представленного в предшествующей работе [2]. Событие характеризуется наличием ускоренных ионов O^+ и O_2^+ ионосферного происхождения с двух сторон от токового слоя, связанного с событием, причем до пересечения аппаратом токового слоя регистрировались частицы до ~10 кэВ, а после – свыше 30 кэВ. Имеется зависимость между массой ионов и максимальной энергией, до которой происходит ускорение, что согласуется с вышеописанным механизмом ускорения частиц у Земли [1].

Наличие тяжелых ионов в АГП возможно, по-видимому, только вблизи планет без собственного глобального магнитного поля, так как их головная ударная волна находится достаточно близко (~1 радиуса планеты) к ионосфере, что позволяет планетным ионам достигать ударной волны, когда она претерпевает серьёзные возмущения. Ускорение планетных ионов в АГП может формировать ещё один канал атмосферных потерь Марса.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 21-42-04404 “Венера и Марс в потоке солнечного ветра. Сравнительный анализ”.



(1) – спектр ионов без разделения масс; (2)-(4) – спектры H+, O+, O2+; (5) – компоненты магнитного поля.

1. Turner D.L., и др. // Nature 2018. V. 561, P. 206–210.
2. Shuvalov S.D., Ermakov V.N., Zorina V.O., Kim K.I. // PSS 2019. V. 179, P. 104717

ФОРМИРОВАНИЕ КАСКАДА ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ В ПЛАЗМЕ ВБЛИЗИ ГРАНИЦ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБОВ.

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

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

В последние годы задача исследования свойств турбулентности солнечного ветра становится все более актуальной и считается одной из приоритетных для флагманских космических проектов, таких как, например, Parker Solar Probe и Solar Orbiter. Этот интерес связан, прежде всего, с необходимостью разработки обновленных эффективных моделей распространения солнечных возмущений в неоднородной и нестационарной плазме солнечного ветра, а также с фундаментальной и до сих пор не решенной задачей нагрева плазмы. Значительный вклад в развитие представлений о свойствах турбулентности в солнечном ветре внес плазменный эксперимент БМСВ на космическом аппарате Спектр-Р, впервые получивший систематические измерения параметров плазмы в солнечном ветре и магнитослое Земли с рекордно высоким временным разрешением вплоть до 31 мс. В частности, на основе статистического анализа свойств спектров турбулентных флуктуаций потока ионов в различных типах крупномасштабных течений солнечного ветра было показано, что спектры, соответствующие приближению свободно развивающейся турбулентности, наблюдаются, как правило, в квазистационарном солнечном ветре, тогда как в возмущенных типах течения часто наблюдаются отличия от теоретических представлений [1,2]. Так, например, в областях компрессии плазмы перед высокоскоростными потоками из областей корональных дыр (CIR) и перед магнитными облаками (Sheath) наблюдается значительное укручение спектров флуктуаций на кинетических масштабах по сравнению с модельными спектрами, свидетельствующее об изменении скорости и характера диссипации в этих областях. Границы разноскоростных потоков могут сдерживать свободное развитие турбулентности в подобных областях, и для описания наблюдаемых особенностей требуется разработка моделей с учетом влияния этих ограничений. В связи с этим представляется важным детальный анализ изменений турбулентного каскада в окрестности границ между потоками плазмы. Данное исследование продолжает цикл вышеуказанных работ по турбулентности солнечного ветра, основанных на плазменных данных спектрометра БМСВ, и направлено на определение роли границ между структурами солнечного ветра различных масштабов в формировании каскада турбулентных флуктуаций. Рассмотрена динамика свойств спектров турбулентных флуктуаций вблизи границ между крупномасштабными типами течения, а также между структурами меньших масштабов (например, потоковыми трубками). Особое внимание уделено анализу изменений спектров на ионных и субионных масштабах, на которых происходит диссипация энергии частиц в плазме. В том числе, выявлены характерные плазменные частоты, определяющие положение излома спектра при переходе от магнитогидродинамических к кинетическим масштабам при пересечении рассматриваемых границ.

1. Riazantseva M., Budaev V., Rakhmanova L., Zastenker G., Yermolaev Yu., Safrankova J., Nemecek Z., Prech L. // J. Plasma Phys. 2017. V. **83**(4). 705830401

2. Рязанцева М.О., Рахманова Л.С., Застенкер Г.Н., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г., // Геомагнетизм и аэрономия. 2019. Т.**59.** №2. С.139-147.

ЭВОЛЮЦИЯ КАСКАДА ТУРБУЛЕНТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В МАГНИТОСЛОЕ

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

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

Спутниковые эксперименты, активно проводимые в последнее десятилетие, позволили значительно расширить представления о турбулентности плазмы в околоземном космическом пространстве. В частности, удалось определить, что при распространении плазмы в магнитослое от околоземной ударной волны в сторону флангов происходит развитие каскада турбулентных флуктуаций. Кроме того, было показано, что на развитие турбулентного каскада в магнитослое оказывают влияние топология ударной волны и тип солнечного ветра. С другой стороны, исследования плазмы солнечного ветра указывают на различие свойств турбулентности в потоках солнечного ветра, относящихся к разным типам течения. При этом вопрос, как происходит изменение турбулентного каскада с различными свойствами при распространении в солнечном ветре и при входе в магнитослой, остается открытым.

В данной работе на основе многоточечного анализа рассматривается динамика характеристик турбулентного каскада при входе плазмы в магнитослой и распространении в нем. Анализируется ряд событий, относящихся к квази перпендикулярной ударной волне, при различных типах набегающего потока солнечного ветра. Проводится сравнение Фурье-спектров флуктуаций, полученных по измерениям в разнесенных точках внутри магнитослоя, а также, в ряде случаев, в солнечном ветре, с учетом времени распространения плазмы между космическими аппаратами. Используются быстрые измерения потока ионов на спутнике Спектр-Р и магнитного поля на спутниках WIND и Themis, что позволяет анализировать спектры турбулентных флуктуаций одновременно в солнечном ветре и магнитослое. Используются данные с максимально доступным временным разрешением, что позволяет исследовать спектры флуктуаций в диапазоне частот 0.01-5 Гц, соответствующем переходу МГД масштабов к кинетическим. Рассматривается сжимаемая компонента флуктуаций (т.е. вариации плотности и модуля магнитного поля), которая вносит значительный вклад в каскад турбулентных флуктуаций в магнитослое. Проведенное исследование показывает, что пересечение околоземной ударной волны приводит к перераспределению энергии в турбулентном каскаде, при этом степень изменения спектров и скорость восстановления каскада отличается для периодов возмущенного и спокойного солнечного ветра.

Колебания потока ионов солнечного ветра вблизи околоземной ударной волны

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

Институт космических исследований ИКИ РАН, sapunova_olga@mail.ru

В работе были проанализированы колебания потока ионов солнечного ветра вблизи околоземной ударной волны (ОЗУВ) с использованием данных, полученных прибором БМСВ (Быстрый Монитор Солнечного Ветра) спутника СПЕКТР-Р. Высокое временное разрешение прибора позволило изучить тонкую структуру фронта ОЗУВ.

В период с 2011 до 2019 было зарегистрировано больше 200 пересечений ОЗУВ, включая множественные события. Более чем в половине случаев наблюдались колебания в потоке солнечного ветра вблизи фронта ОЗУВ.

Было показано, что колебания потока ионов с частотами в интервале 3-4 Гц встречались примерно в 25% событий. Реже - в 5-7% событий были зарегистрированы колебания частотой 5-6 Гц. В единичных случаях наблюдались колебания потока ионов солнечного ветра с частотами более 7 Гц. Были также отмечены события, в которых вовсе отсутствовали колебания потока.

Также наблюдались колебания потока ионов низких частот - от 0,1 Гц и ниже. Эти колебания были отмечены как по данным с высоким временным разрешением, там и по данным концентрации и скорости ионов (протонов и дважды ионизированного гелия), включая относительное содержание ионов гелия.

ВКЛАДЫ ТУРБУЛЕНТНОГО СЛОЯ И МАГНИТНОГО ОБЛАКА В АМПЛИТУДУ СПОРАДИЧЕСКИХ ФОРБУШ ПОНИЖЕНИЙ

Петухова А.С., Петухов И.С., Петухов С.И.

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

В данной работе приведены результаты совместного анализа плотности числа космических лучей и свойств солнечного ветра. Критерии выбранных событий: а) МКВМ, сопровождающиеся ударным фронтом, турбулентным слоем, магнитным облаком; б) установлены времена регистрации ударного фронта , границ МКВМ и магнитного облака. Использованы данные из статьи Ричардсона и Кейн [1]. 1- часовые данные свойств солнечного ветра приведены в базе данных OMNI. Использованы 1-часовые данные плотности космических лучей, приведенные в базе данных ИЗМИРАН, где она рассматривается методом глобальной съемки по данным мировой сети нейтронных мониторов. Были исследованы сильные Форбуш понижения (события с амплитудой больше 5%). За период 1998-2006 гг. было зарегистрировано 23 события, удовлетворяющих принятым критериям. Целью исследования является оценка вклада турбулентного слоя и магнитного облака в амплитуду Форбуш понижения.

Максимальное понижение плотности космических лучей составляют две части: одна часть понижения поисходит в турбулентном слое, другая часть происходит в магнитном облаке. Анализ проведен методом наложения эпох. В качестве нулевого часа, использован момент регистрации передней границы магнитного облака.

Средняя величина амплитуды Форбуш понижения $A_{фп}$ = 6.3%. При этом часть Форбуш понижения в турбулентном слое $A_{тс}$ = 3.4% ($A_{тс}$ = 0.54 $A_{фп}$) и в магнитном облака $A_{мо}$ = 2.9% ($A_{мо}$ = 0.46 $A_{фп}$). Для определения механизмов формирования Форбуш понижения можно сравнить наши результаты с результатами Фадак, Батруддина [2], которые провели аналогичное исследование для всех Форбуш понижений в МКВМ, зарегистрированных в период 1996-2018 гг. и удовлетворяющим тем же критериям: $A_{фп,*}$ = 2%, $A_{тс,*}$ = 0.6 $A_{фп,*}$, $A_{мо,*}$ = 0.4 $A_{фп,*}$. Из сопоставления следует, что увеличение понижения плотности космических лучей в турбулентном слое (3.3/1.2) происходит вследствие увеличения турбулентности магнитного поля (10.5/5), что согласуется с диффузионным механизмом. Увеличение понижения в магнитном облаке (2.9/0.8) происходит вследствие увеличения напряженности регулярных магнитного (23/13.5) и электрического (16/7.3) полей, чт осогласуется с электромагнитным механизмом.

Сильные Форбуш понижения можно разделить на две группы в зависимости от соотношения $A_{мо} > A_{тс}$ (1-я группа) или $A_{мо} < A_{тс}$ (2-я группа). Количество событий в обеих группах почти одинаково. Анализ событий, проведенный методом наложения эпох, показывает следующую разницу: $A_{фп,1}$ / $A_{фп,2}$ = 8.3 / 4.5, $A_{тс,1}$ / $A_{тс,2}$ = 2.8 / 4, $A_{мо,1}$ / $A_{мо,2}$ = 5.5 / 0.5. Полученные результаты показывают, что 1-ю группу составляют самые сильные Форбуш понижения, которые формируются при высокой эффективности диффузионного и электромагнитного механизмов. При высокой эффективности только диффузионного механизма образуются просто сильные понижения.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № АААА–А21-121011890014-0.

1. Richardson I. G., Cane H. V. Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections During Solar Cycle 23 (1996 – 2009): Catalog and Summary of Properties. // Solar Physics. 2010.Vol. 264. P. 189–237.

2. Fadaaq, M., & Badruddin, B. Modulation of Galactic Cosmic Rays Due to Magnetic Clouds and Associated Structures in the Interplanetary Space: 1996-2018. // Astrophysics. 2021. 64(2). 210–218. doi:10.1007/s10511-021-09682-3.

Models of heliospheric characteristics in corotating interaction regions for long-term GCR modeling

Krainev[1] M.B., Bazilevskaya[1] G.A., Kalinin[1] M.S., Svirzhevskaya[1] A.K., Svirzhevsky[1] N.S., Luo[2] Xi, Aslam[2] O.P.M., Ngobeni[3,4] M.D., Potgieter[5] M.S.

[1]Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
[2]Shandong Institute of Advanced Technology (SDIAT), Jinan, Shandong, China
[3]Centre for Space Research, North-West University, Potchefstroom, South Africa
[4]School of Physical and Chemical Sciences, North-West University, Mmabatho, South Africa
[5]Institute for Experimental and Applied Physics, Christian Albrechts University, Kiel, Germany
e-mail: mkrainev46@mail.ru

ABSTRACT

Interaction regions that corotate with the Sun (CIRs) are regularly present at low and intermediate heliospheric latitudes (the sector-structure zone of the heliospheric magnetic field (HMF)). These CIRs cause rotational recurrent variations (27-days) in GCR intensity which have been extensively studied, also recently. The amplitude of this variation (A_{27d} < 10%) is much smaller than that of the long-term (11-year or solar cycle) variation (A_{11y} < 100%). However, besides the strong longitudinal dependence in the modulating factors such as the solar wind (SW) velocity, the direction and strength of the HMF in the sector-structure zone, there are also CIR-effects in the longitudinally averaged heliospheric characteristics which could be important also in establishing the long-term GCR intensity variation. Due to the pumping of the HMF from the SW in this zone, a difference appears in the level and in the form of the fluctuating HMF spectrum inside the sector-structure zone compared to outside it.

In this talk, we discuss existing models of the main heliospheric characteristics reflecting CIR-effects for a study of what contributes to the long-term GCR variations. Furthermore, new models of the propagation coefficients in the GCR transport equation are formulated incorporating CIR-effects and which are directly related to the main features of the SW and the HMF: 1)The presence of the heliospheric current sheet (HCS) dividing the heliosphere into two hemispheres of opposite HMF polarity and 2) the strong dependence of the SW velocity on the distance from the HCS. The parameters of these models are determined so that they better satisfy SW and HMF observations.

ФОРБУШ-ЭФФЕКТЫ, НАБЛЮДАВШИЕСЯ НА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТАХ МИССИИ HELIOS

Шлык Н.С., Белов А.В., Абунина М.А., Абунин А.А.

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

Выделены и исследованы Форбуш-эффекты (ФЭ) на основе данных космических аппаратов Helios A и B, функционировавших в период с декабря 1974 по февраль 1986 гг. Составлен подробный каталог Форбуш-эффектов – Helios FD, включающий в себя характеристики космических лучей, солнечного ветра (СВ), межпланетного магнитного поля (ММП) и вызвавших их межпланетных возмущений. Исследована радиальная зависимость амплитуды ФЭ, скорости солнечного ветра и величины межпланетного магнитного поля. Показано, что величины ФЭ на аппаратах Helios также как величины ФЭ, наблюдавшихся у Земли, хорошо коррелируют с произведением максимальных величин скорости СВ и модуля ММП. Установлено, что величина Форбуш-эффектов на различных расстояниях от Солнца определяется характеристиками межпланетных возмущений и почти не зависит от радиального расстояния.

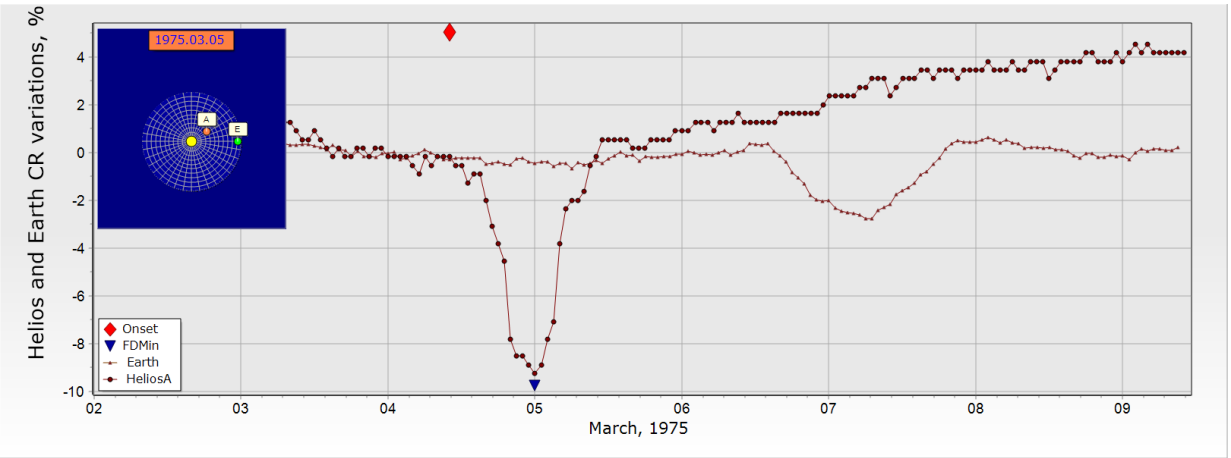


Рис. Пример Форбуш-эффекта, зарегистрированного по данным космического аппарата Helios A (4-5 марта 1975 г.) и по данным нейтронных мониторов на Земле (6-7 марта 1975 г.)

ОБ ОСТАТОЧНОЙ МОДУЛЯЦИИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ГЕЛИОСФЕРЕ

Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т., Кобелев П.Г., Трефилова Л.А.

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

Точные измерения спектров галактических космических лучей (КЛ) на орбите Земли с помощью космических экспериментов PAMELA, AMS-02 и измерения межзвездного спектра на границе гелиосферы с помощью Voyager 1/2 стали мощным стимулом для детального изучения модуляции КЛ. В работе ставится вопрос, насколько измеренная интенсивность в минимуме солнечной активности отличается от истинного значения интенсивности локального межзвездного спектра (LIS) КЛ, и какова остаточная модуляция и её спектр.

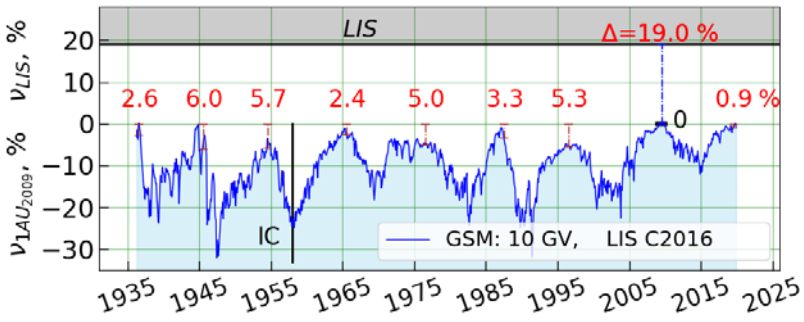


Рис.1. Остаточная модуляция Δ для данных ионизационных камер и детекторов сети нейтронных мониторов R_{eff} =10 GV. Цифры у кривых – вариации относительно минимума 2009 г.

Численно остаточная модуляция Δ определяется как вариация измеряемой на орбите Земли интенсивности J_{1AU} частиц жесткости R_{eff} относительно J_{LIS}, т.е. $\Delta = J_{1AU} / J_{LIS} - 1$. Для наземных измерений J_{1AU} использовались данные сети нейтронных мониторов (эффективная жесткость R_{eff} =10 GV), мюонных телескопов (R_{eff} =41 GV) и данных стратосферного зондирования (R_{eff} =4 GV), калиброванные по данным PAMELA. В качестве LIS спектров использовались только модели LIS спектров [Corti et al., ApJ., V.829:8, 2016] с привлечением измерений Voyager и AMS-02 для R> 100 GV.

Для частиц жесткостью 10 GV для периода 2009 года значение остаточной модуляции из $\Delta = J_{1AU} / J_{LIS} - 1$ равно $|\Delta|$=19±0.4(stat)±2(sys) % (рис.1), что в хорошем согласии с [McCracken et.al., JGR, V.112, A10101, 2007]. Анализ модуляции КЛ в гелиосфере показал, что даже в период наиболее спокойного Солнца остаточная модуляция существенна. Из этого следует, что Солнце в своей активной фазе способно модулировать КЛ относительно спокойного периода приблизительно так же, как и спокойное Солнце способно модулировать локальный межзвездный спектр.

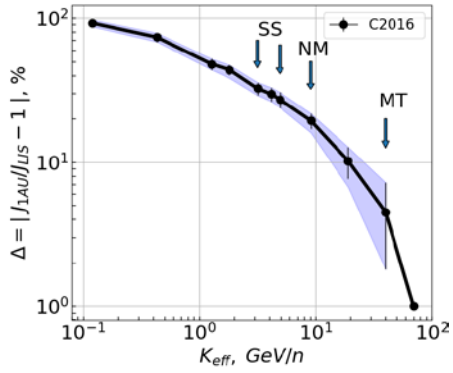


Рис.2. Спектр остаточной модуляции.

Большие значения полной (остаточной + наблюдаемой) модуляции можно объяснить радиальной зависимостью коэффициента диффузии. При зависимости $K_0 \sim r$ и $dJ/dr \propto r^{-1}$, т.е. модуляция в основном происходит в ближней гелиосфере. При коэффициенте диффузии K_0=const модуляция линейна $M \sim r$ и $dJ/dr \approx 1\%/AU$, т.е. модуляция происходит во всей гелиосфере, и полная модуляция ожидается большой. На рис.2 приведен спектр остаточной модуляции, который является степенным с переменным показателем спектра γ от -1 до -2 для энергий от 4 до 40 GeV.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ “Сеть СКЛ”.

О ФОРМЕ НАБЛЮДАЕМОГО СПЕКТРА ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

Стародубцев С.А.

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

Воздействие плазмы солнечного ветра на потоки проникающих извне в гелиосферу галактических космических лучей (КЛ) с энергиями выше ~1 ГэВ приводит к возникновению временных изменений (вариаций) интенсивности КЛ в широком диапазоне частот. Поскольку КЛ являются заряженными частицами, то их модуляция происходит под воздействием, главным образом, межпланетного магнитного поля (ММП).

Хорошо известно, что наблюдаемый спектр флуктуаций ММП в широкой области частот ν от ~10^{-7} до ~10 Гц носит ярко выраженный падающий характер и состоит из трех участков - энергетического, инерционного и диссипативного. Каждый из них описывается степенным законом $P_B(\nu) \sim \nu^{-\alpha}$, причем показатель спектра ММП α увеличивается с ростом частоты. При этом на каждом из этих участков флуктуации ММП характеризуется свойствами, зависящими от их природы.

Также известна и установленная связь между спектрами флуктуаций ММП и галактических КЛ в случае модуляции последних альфвеновскими или быстрыми магнитозвуковыми волнами [1,2]. Теория предсказывает, что спектры флуктуаций КЛ должны описываться также степенным законом $P_{CR}(\nu) \sim \nu^{-\gamma}$. Однако, результаты многолетних работ сотрудников ИКФИА СО РАН по изучению природы и свойств флуктуаций интенсивности КЛ с использованием данных регистрации нейтронных мониторов на станциях с различными порогами геомагнитного обрезания Rc от 0.5 до 6.3 ГВ, показывают, что наблюдаемый спектр флуктуаций интенсивности галактических КЛ в области частоты выше 10^{-4} Гц становится плоским, т.е. он подобен белому шуму. Этот факт требует своего понимания и объяснения.

В данной работе на основе данных измерений нейтронного монитора станции Апатиты приводятся результаты изучения формы спектра флуктуаций интенсивности галактических КЛ в области частот ν от ~10^{-6} до ~1 Гц и их сопоставления с модельными расчетами спектров белого шума. Дано возможное физическое объяснение наблюдаемой формы спектра флуктуаций КЛ на основе известных механизмов модуляции КЛ в гелиосфере.

Работа выполнена в рамках Государственного задания АААА-А21-121011890014-0.

1. Owens A.J. // J. Geophys. Res. 1974. V.**79.** P.895-906.
2. Бережко Е.Г., Стародубцев С.А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т.**52.** С.2361-2363.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ И ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ СИЛОВЫХ ЛИНИЙ ГАЛАКТИЧЕСКОГО И СОЛНЕЧНОГО МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Ю. И. Стожков, В. С. Махмутов, Г. А. Базилевская, Н. С. Свиржевский, А. К. Свиржевская, М.В. Филиппов

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

Обнаружена синхронность временного хода потоков космических лучей (далее КЛ), имеющих разные по знаку электрические заряды ***q***: ***q*** > 0 - протоны и ядра, позитроны: $q < 0$ – электроны. Согласно современным представлениям временной ход частиц с ***q*** > 0 должен иметь пикообразную форму в отрицательные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла (***A*** < 0) и плоскую вершину в положительные фазы (***A*** > 0). Для частиц с ***q*** < 0 имеем противоположную картину. Такое поведение частиц в гелиосфере определяется дрейфом частиц в квазирегулярном солнечном магнитном поле [1[.

Направление дрейфовых токов зависит от направления солнечного магнитного поля (***A*** < 0 или ***A*** > 0) и знака заряда частиц. В положительные фазы 22-летнего солнечного магнитного циклы силовые линии магнитного поля Солнца выходят из северной полярной шапки Солнца (A > 0), в отрицательные фазы - входят в северную полярную шапку Солнца (***A*** < 0). В южной полярной шапке Солнца имеет место обратная картина.

Однако анализ временных зависимостей КЛ с ***q*** > 0 **и** q < 0 показывает, что эти зависимости ведут себя одинаково для частиц с ***q*** > 0 **и** ***q*** < 0. Это означает, что временной ход частиц определяется фактором, для которого знак заряда не играет существенной роли.

Наблюдаемый эффект можно объяснить, если в отрицательные фазы 22-летнего солнечного магнитного цикла (***A*** < 0) имеет место пересоединение магнитных силовых линий Солнца и галактического поля. Мы называем такое состояние «открытой» гелиосферой. В положительные фазы (***A*** > 0) пересоединение отсутствует и образуется «закрытая» гелиосфера. Область пересоединения находится на расстоянии около 100 а.е., где основным процессом модуляции КЛ является диффузия, для которой знак электрического заряда не имеет значения. Данные космического аппарата Вояджер -1 позволяют предположить, что область пересоединения находится между ударной волной (termination shock) и гелиопаузой (heliopause), т. е. занимает около 25 а.е. [2].

Полученный результат требует пересмотра современных моделей модуляции КЛ в гелиосфере.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ГЗ019ДНС008 109.61 2021.

1. Стожков Ю.И., Махмутов В.С., Базилевская Г.А. и др. // Изв. РАН. сер. физ. 2021. Т. 85. № 9, С. 1359–1361.
2. Cummings A.C., Stone E.C., Heikkila B.C., et al. // Ap.J. 831:18 (21pp), 2016 November 1. doi:10.3847/0004-637X/831/1/

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАХВАЧЕННЫХ ПРОТОНОВ ЗА ГЕЛИОСФЕРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ КА IBEX

Балюкин И.И., Измоденов В.В., Алексашов Д.Б.

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

Захваченные протоны рождаются в результате ионизации атомов водорода в области сверхзвукового солнечного ветра и формируют надтепловую компоненту протонов в гелиосфере. Будучи захваченными гелиосферным магнитным полем и перенесенными в область внутреннего ударного слоя, на своем пути протоны могут испытывать стохастическое ускорение, обусловленное турбулентностью солнечного ветра. В области ударного фронта частицы могут быть также подвержены дрейфовому ускорению или зеркальному отражению (ударному «серфингу»). Эти процессы образуют высокоэнергетический «хвост» в распределении по скоростям. Свойства энергичной популяции протонов до сих пор недостаточно хорошо изучены, несмотря на то, что количественные оценки этих свойств являются необходимыми для моделирования потоков энергичных нейтральных атомов, которые рождаются при перезарядке захваченных протонов с межзвездными атомами водорода.

Были рассмотрены два вида функции распределения захваченных протонов по скоростям за гелиосферной ударной волной: (1) заполненная оболочка («filled shell distribution») с энергетическим хвостом, который моделировался при помощи степенного закона, и (2) би-Максвелловское распределение. Проведено параметрическое исследование распределения популяции энергичных захваченных протонов с использованием данных наблюдений прибора IBEX-Hi (на борту КА *Interstellar Boundary Explorer*) потоков энергичных нейтральных атомов из внутреннего ударного слоя и на основе численных моделей: (а) глобальной кинетико-МГД модели взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой (Izmodenov & Alexashov, 2020), и (б) нестационарной кинетической модели распределения захваченных протонов (Baliukin et al., 2020). В результате исследования впервые были получены количественные оценки на параметры энергичной популяции захваченных протонов, характеризующие эффективность ускорения протонов на ударном фронте, для различных положений за гелиосферной ударной волной.

Исследование влияния солнечного цикла на глобальную структуру гелиопаузы: новый эффект стабилизации гелиопаузы периодичным ветром.

С.Д. Корольков[1,2,3], В.В. Измоденов[1,2,3]

[1]Институт космических исследований РАН, Москва,
[2]МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва,
[3]Центр фундаментальной и прикладной математики МГУ, Москва
Korolkov.msu@mail.ru

Обнаруженная неустойчивость гелиопаузы в численных расчётах в рамках упрощённых моделей не реализуется в данных наблюдений за реальными объектами. Такое несоответствие может быть объяснено влиянием магнитных полей и/или перезарядкой нейтральных атомов вблизи гелиопаузы и/или другими стабилизирующими эффектами. В данной задаче предлагается исследовать новый эффект стабилизации гелиопаузы и тангенциального разрыва от тройной точки, обусловленный влиянием периодического звёздного ветра. Для солнечного ветра глобальный период колебаний представлен 11-летним циклом.

В работе показано, что представленный механизм стабилизации является эффективным, найдены значения периода колебания расхода массы звезды, обладающего наилучшим стабилизирующем эффектом для различных параметров звёзд. Для Солнца такой период приблизительно равняется одному году звёздной активности.

Задача является актуальной, потому что вопрос об устойчивости гелиопаузы до сих пор является открытым. Численные решения разных авторов получаются неустойчивыми, в то время как данные эксперимента (наблюдений) говорят об обратном.

Методы: задача будет решена в осесимметричной постановке в рамках классической газовой динамики. Планируется использовать Годуновские методы со вторым порядком точности по пространству (TVD – схема). Задача о распаде разрыва для возможности сравнения результатов будет решаться разными методами: честными (метод Годунова) и приближёнными (HLL, HLLC). Задача исследования неустойчивости усложняется необходимостью добиваться высокого пространственного разрешения (порядка 1 а.е. при размерах задачи порядка 1000 а.е. по обеим осям). Такое разрешение достигается методами параллельного программирования CUDA на видеокартах.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДА ЧАСТИЦ МЕЖЗВЕЗДНОЙ ПЫЛИ В ГЕЛИОСФЕРНОМ УДАРНОМ СЛОЕ. ФИЛЬТРАЦИЯ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ НА ГРАНИЦЕ ГЕЛИОСФЕРЫ.

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

[1] *ИПМех РАН, г. Москва, Россия, eg24@yandex.ru*

[2] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

[3] *МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия*

Солнце движется относительно локальной межзвездной среды со скоростью ~ 26.4 км/сек. В результате взаимодействия плазмы солнечного ветра и частично-ионизованной плазмы локальной межзвездной среды образуется структура из двух ударных волн и тангенциального разрыва между ними, которая называется гелиосферным ударным слоем. В межзвездной среде, помимо плазменной и нейтральной компонент, присутствует также пылевая компонента, частицы которой (из-за относительного движения) могут проникать внутрь гелиосферы, пересекая гелиосферный ударный слой. Параметры плазмы (плотность, скорость, температура, магнитное поле) в гелиосферном ударном слое существенно отличаются от параметров плазмы в невозмущенных солнечном ветре и межзвездной среде, что значительно влияет на заряд и траектории пылевых частиц. Цель данной работы – исследование процесса формирования заряда пылевых частиц в гелиосферном ударном слое. Построенная модель для заряда пылевых частиц поможет ответить на вопросы о том, пылинки какого размера и в каком количестве способны проникать внутрь гелиосферы.

На заряд частиц межзвездной пыли оказывают влияние множество физических процессов: 1) прилипание протонов и электронов из окружающей плазмы на поверхность пылинки; 2) вторичная электронная эмиссия, которая образуется в результате падения на поверхность пылинки электронов высоких энергий; 3) различные виды фотоэлектронной эмиссии; 4) эффекты, связанные с космическими лучами в межзвездной среде. Токи, соответствующие упомянутым процессам, зависят от условий среды, которая окружает пылинки, а также от свойств самих пылинок: их формы, размера, химического состава. Для вычисления заряда используется приближение равновесного заряда, которое в случае гелиосферы оказывается достаточно точным [1]. Равновесный заряд – заряд, при котором алгебраическая сумма токов по всем физическим процессам равна нулю. Помимо вычисления равновесного заряда, на основе предположения о статистическом равновесии [2], проведены также расчеты вероятностного распределения заряда и показано, что среднее по такому распределению (в случае гелиосферы) близко к равновесному заряду, а дисперсия мала. Для вычисления токов, связанных с прилипанием частиц плазмы, а также вторичной электронной эмиссией, используются распределения плазмы из трехмерной кинетико-магнитогидродинамической глобальной модели гелиосферы [3], а для вычисления фотоэмиссионных токов используются осредненные по времени данные по потокам солнечных фотонов (TIMED/SEE) и оптические константы, взятые из [4].

[1] Kimura H., Mann I., 1998, ApJ, V. **499**, 454

[2] Draine B.T., Sutin B., 1987, ApJ, V. **320**, 803

[3] Izmodenov V.V., Alexashov D.B., 2020, A&A, V. **633,** L12

[4] Laor A., Draine B.T., 1993, ApJ, V. **402**, 441

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЫСВЕЧИВАНИЯ НА СТРУКТУРУ И УСТОЙЧИВОСТЬ АСТРОСФЕР

Титова А.В., Корольков С.Д., Измоденов В.В.

НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, avtitova_1@edu.hse.ru

Объемное охлаждение плазмы, вызванное эффектами высвечивания, может иметь важное значение в построении модели астросфер – структур, возникающих при взаимодействии звездного ветра с межзвездной средой. Такие структуры в настоящее время в большом количестве наблюдаются в различных длинах волн. Анализ характеристик астросфер играет большую роль в исследовании эволюции звезд и околозвездного пространства.

Для описания движения звезды в окружающей ее среде была рассмотрена двумерная задача об обтекании гиперзвукового источника набегающим параллельным сверхзвуковым потоком. В рассматриваемой модели оба газа считаются совершенными и невязкими с показателем адиабаты $\gamma = 5/3$. Из-за высвечивания газ в единицу времени теряет энергию $n^2\Lambda(T)$, где n – концентрация, $\Lambda(T)$ – коэффициент охлаждения, зависящий от температуры и состава среды. В результате взаимодействия двух сверхзвуковых потоков возникает сложная газодинамическая структура. В головной области образуются две ударные волны и тангенциальный разрыв, который разделяет звездный ветер и межзвездную среду (астропауза). В хвостовой части возникает диск Маха и тройная точка, откуда исходит вторичный тангенциальный разрыв и вторичная ударная волна.

Результаты моделирования показывают, что эффекты высвечивания оказывают значительное влияние на структуру и устойчивость области взаимодействия потоков. Было установлено, что объемное охлаждение газа приводит к уменьшению его скорости в ударном слое. Если у газа есть достаточно времени, чтобы значительно остыть, прежде чем он успеет переместиться дальше по течению в хвостовую область, то около тангенциального разрыва будет образовываться холодная плотная зона. С увеличением параметров высвечивания и, соответственно, скорости охлаждения эта зона будет становиться больше. Рост плотности вызывает увеличение давления и сжатие области взаимодействия. Таким образом, охлаждение газа, вызванное эффектами высвечивания, приводит к сжатию области взаимодействия и изменению положения астропаузы – она становится ближе к звезде. В то же время тройная точка будет отдаляться от звезды. При достаточно больших значениях параметров высвечивания внутренняя и внешняя ударные волны будут также приближаться к звезде. Кроме того, было замечено, что увеличение плотности приводит к развитию неустойчивости Кельвина-Гельмгольца тангенциального разрыва. Данная неустойчивость сильно нарастает в хвостовой части течения, а также начинает сдвигаться в сторону головной части.

Работа поддержана грантом РНФ 19-12-00383.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИТНЫХ ПОГЛОЩЕНИЙ "ГОРЯЧИХ ЮПИТЕРОВ" В ЛИНИИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО ГЕЛИЯ

Руменских М.С., Березуцкий А. Г., Мирошниченко И. Б., Шепелин А.В. Шайхисламов И.Ф.

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

Процессы, происходящие в окрестности экзопланет, являются комплексными и сложными для интерпретации. На данный момент накоплено немалое количество наблюдательных данных о таких объектах, и их объем продолжает расти благодаря новым космическим миссиям. Долгожданный запуск JWST обещает открыть новую эру в наблюдательной астрофизике, однако количество работ, посвященных интерпретации наблюдательных данных, значительно уступает количеству работ, описывающих их получение. Следовательно, развитие численных моделей, описывающих комплексное взаимодействие в системах звезд с экзопланетами, кажется особенно актуальным в свете нарастающего объема эмпирических данных об атмосферах экзопланет.

Параметры «горячих юпитеров» (период обращения вокруг звезды, отношение радиуса планеты к звездному, нередко обширная атмосфера) являются наиболее оптимальными с точки зрения наблюдения транзитных поглощений. Первые наблюдения транзитов, выполненные в линии Ly-α [1, 2], показали истечение планетарного вещества за пределы полости Роша для некоторых «горячих юпитеров» что подтвердило предположение о гидродинамическом истечении планетарного вещества [3]. Наблюдение поглощений в данной линии позволило получить немало информации об атмосферах экзопланет, однако при прохождении через межзвездную среду она значительно искажается, что мотивировало поиски иных спектральных диапазонов.

Линия метастабильного гелия (2^3S-2^3P, λ=1083 нм) незначительно искажается при прохождении через межзвездную среду, а также попадает в окно прозрачности атмосферы Земли. Последнее в совокупности с яркостью этой линии в спектре звезд позволяет детектировать её поглощение наземными телескопами. В работах [4-6] приведены результаты детектирования спектрально разрешенных транзитных поглощений для различных экзопланет в данной спектральной линии, выполненные наземными телескопами.

В настоящей работе проведен анализ наблюдательных проявлений особенностей взаимодействия экзопланетарных атмосфер с излучением и ветром родительских звезд. Анализ был выполнен для ряда экзопланет: Toi-421b&c, Wasp-52b, GJ-4370b, GJ-436b. Для данных экзопланет выполнено численное моделирование транзитных поглощений в линии метастабильного гелия с использованием многожидкостной 3Д МГД модели с учетом процессов плазмофотохимии водородной и гелиевой компонент [7].

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

[1] Vidal-Madjar, A., et al. "An extended upper atmosphere around the extrasolar planet HD209458b." *Nature* 422.6928 (2003): 143-146.

[2] Ehrenreich, David, et al. "A giant comet-like cloud of hydrogen escaping the warm Neptune-mass exoplanet GJ 436b." *Nature* 522.7557 (2015): 459-461.

[3] Lammer, H., et al. "Atmospheric loss of exoplanets resulting from stellar X-ray and extreme-ultraviolet heating." *The Astrophysical Journal Letters* 598.2 (2003): L121.

[4] Alonso-Floriano, F. Javier, et al. "He I λ 10 830 Å in the transmission spectrum of HD209458 b." *Astronomy & Astrophysics* 629 (2019): A110.

[5] Salz, Michael, et al. "Detection of He I λ10830 Å absorption on HD 189733 b with CARMENES high-resolution transmission spectroscopy." *Astronomy & Astrophysics* 620 (2018): A97.

[6] Palle, E., et al. "A He I upper atmosphere around the warm Neptune GJ 3470 b." *Astronomy & Astrophysics* 638 (2020): A61.

[7] Shaikhislamov, I. F., et al. "Global 3D hydrodynamic modelling of absorption in Ly α and He 10830 A lines at transits of GJ3470b." *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 500.1 (2021): 1404-1413.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ОВЕРШУТА В ПОТОКЕ ИОНОВ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ОТ ПАРАМЕТРОВ ФРОНТА УДАРНОЙ ВОЛНЫ

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

[1] *Институт космических исследований РАН(ИКИ РАН), г. Москва, Россия, nlbor@mail.ru*

[2] *Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ РАН), г. Иркутск, Россия*

По данным измерений плазменного спектрометра БМСВ, установленного на космическом аппарате (КА) СПЕКТР-Р, дополненных измерениями магнитного поля на КА WIND и DSCOVR, была исследована структура течения плазмы солнечного ветра за рампом межпланетной и околоземной ударных волн и был проведен анализ связи основных параметров, характеризующих фронт ударной волны, с образованием овершута. На основании статистического анализа пересечений фронтов ударных волн получено, что с ростом числа Маха величина овершута в потоке ионов, в среднем, возрастает. Около половины овершутов в потоке ионов солнечного ветра наблюдались у межпланетных ударных волн с числами Маха, меньшими, чем значение первого критического числа Маха, что указывает на присутствие отраженных ионов, вносящих свой вклад в структуру фронта ударной волны наряду с дисперсией косых магнитозвуковых волн.

Зависимость величины овершута в потоке ионов от параметра бета β_i надежно подтвердить не удалось. Получена зависимость максимальной величины овершута в потоке ионов от магнитной и плазменной компрессии на фронте ударной волны.

За фронтом ударных волн наблюдались коррелированные, затухающие при удалении от рампа, колебания потока ионов и магнитного поля. Показано, что длина волны колебаний, определенная по измерениям потока ионов, в среднем, совпадает с длиной волны колебаний магнитного поля, и хорошо коррелирует с величиной ионного гирорадиуса, в то время как пространственные масштабы областей затухания этих колебаний могут сильно различаться.

О СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЯХ 23, 24 И 25 ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ (ПО МАТЕРИАЛАМ КАТАЛОГОВ СПС)

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

1 НИИЯФ МГУ, 2 ФИАН, 3 ИПГ, 4 ИЗМИРАН, 5 ГЦ РАН, г. Москва, Россия, nav19iv@gmail.com

Солнечное протонное событие (СПС) – одно из наиболее важных проявлений солнечной активности (СА). СПС – очень сложные, разнообразные, в настоящее время недостаточно изученные и плохо предсказуемые явления. Возможность определить закономерности процессов, типичные и экстремальные характеристики явлений может предоставить только большой статистический материал, собираемый в каталогах СПС. Каталоги СПС являются также необходимым и, пожалуй, единственным инструментом для планирования и обеспечения безопасности космических миссий, так как одной из основных угроз для них является радиационное поражение от солнечных заряженных энергичных частиц. Серия каталогов СПС 20-24 циклов СА [1] – оригинальный проект, не имеющий аналогов в мировой научной практике, так как (вместе с первым каталогом Z. Svestka и P. Simon [2]) охватывает огромный временной интервал (1955-2019 гг., т.е. практически 6 полных 11-летних циклов солнечной активности – с 19 по 24 циклы) [http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/]. На сайте Центра данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ [http://smdc.sinp.msu.ru] в разделе «Космическая погода» [http://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/index.php?gcm=1&lang=ru] создана общедоступная интерактивная форма Каталога СПС 24 цикла СА, а также представлены каталоги 20-23 циклов СА.

24 цикл СА – первый цикл второй эпохи пониженной солнечной активности [3]. По прогнозу в 25 цикле СА максимум цикла ожидается в первой половине 2024 г. с максимальным числом солнечных пятен ~165 [4].

23 и 24 циклы солнечной активности различаются в наибольшей степени следующими параметрами: максимальное значение сглаженных за месяц солнечных пятен – 180.3 и 116.4; период, когда наблюдались СПС с $J(E>10$ МэВ$)\geq 1$ pfu, – 10 лет (1997-2006 гг.) и 8 лет (2010-2017 гг.); количество СПС с $J(E>10$ МэВ$)\geq 1$ pfu – 133 и 100; количество *GLE* – 16 и 2, соответственно. Распределения интенсивности потоков солнечных протонов с $E>10$ МэВ в максимуме событий по времени цикла, по мощности событий, по гелиокоординатам не имеют существенных различий в 23 и 24 циклах СА [5].

С 2020 г., с начала 25 цикла СА, произошло 6 СПС с $J(E>10$ МэВ$)\geq 1$ pfu, среди которых 1 *GLE*-событие - 28.10.2021. Сравнение солнечной активности в виде СПС в 25 цикле с 23 и 24 циклами свидетельствует о меньшей солнечной активности 25 цикла по сравнению с 23 циклом, но с большей по сравнению с 24 циклом.

1. Каталоги СПС 20-24 циклов СА http://www.wdcb.ru/stp/data/SPE/
2. Catalog of solar particle events 1955-1969. Ed. By Z.Svestka and P.Simon. Astrophysics and Space Science Library. V.49. Dordrecht. Holland: D. Reidel Publishing Company. 1975.
3. Ишков В.Н // Cosmic Res. 2020. V. **58**. No. 6. P. 436–443. DOI**:** 10.1134/S0010952520060064
4. Ишков В.Н. // "Магнетизм и активность Солнца и звезд - 2021" (Крым-2021). https://sun.crao.ru/images/conference/2021/poster/Ishkov_poster.pdf
5. Власова Н.А., Логачев Ю.И., Базилевская Г.А. и др. // Космические исследования. 2022. Т. **60.**

О РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАРАМЕТРОВ ТИХОГО СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Высикайло Ф.И.

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

Изучение интерференции гравитационного и электрического потенциалов на поверхности Земли началось с работы Гильберта в 1600 г. Такие поляризационные эффекты - интерференция кулоновских и гравитационных сил для заряженных частиц в гелиосфере недостаточно хорошо изучены до сих пор. Наш доклад посвящен этой проблеме в солнечном ветре (SW). Необходимость учета поляризации звезд и звездных сфер была впервые сформулирована Паннекуком в 1922 году [1] и Росселандом в 1924 году [2]. Из-за разницы в силах тяжести положительные частицы удерживаются гравитацией более эффективно, чем электроны вокруг любой звезды. Согласно этому электрическое поле создается при размерах, превышающих радиус Дебая, компенсируя тенденцию к разделению частиц в любом гравитирующем плазмоиде. Соответствующее эл. поле, возвращающее электроны звезде, называется полем Паннекука-Росселанда. Используя этот метод Эддингтон аналитически оценил эффективный положительный заряд Солнца $Q_S \approx 300$ Кл [3]. Уже этот заряд Солнца в 300 Кл соответствует появлению отражающих кулоновских зеркал не только для протонов, но и для альфа-частиц. Впервые это было отмечено нами [4]. В соответствии с типами наблюдаемых в экспериментах положительных ионов в SW, мы определили величину эффективного квазипостоянного положительного заряда Солнца в $Q_S = 1400$ Кл [4].

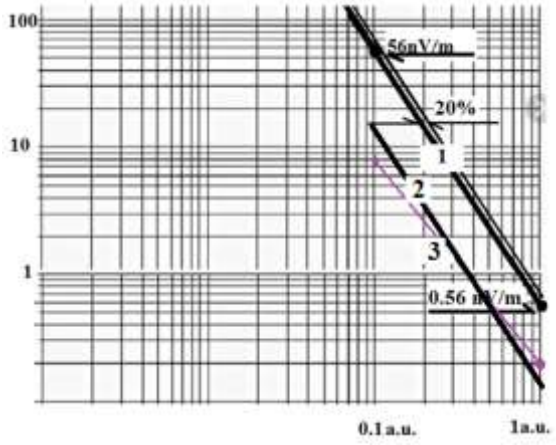


Рис. *Расчеты эл. полей в гелиосфере: 1 - по спектру положительных ионов в солнечном ветре [4] (Q_S = 1420 Кл; погрешность менее 20%); 2 - по расчетам Эддингтона [3]; 3 - по расчетам электрического поля на основе экспериментальных наблюдений функции распределения электронов с помощью солнечного зонда Parker [5] (Q_S = 200 ÷ 500 Кл).*

Зная Q_S, мы можем рассчитать энергию положительно заряженных частиц, рожденных в солнечной короне, и сравнить ее с энергией частиц, наблюдаемых экспериментально на орбите Земли. Эти сравнения хорошо согласуются с эффективным зарядом Солнца 1400 Кл [4]. При солнечном заряде, определенном в [4] (рис. зависимость 2), энергия протона в SW в 4,5 раза меньше, чем наблюдаемая при медленном SW, а при определенной в [5] (рис. зависимость 3) она в 7 раз меньше, чем наблюдается в SW у Земли. Проверка математических моделей гелиосферы должна проводиться комплексно, с учетом всех фактов, наблюдаемых экспериментально, с учетом типов положительных ионов, наблюдаемых в SW. Во всех моделях (см. ссылки в [5]) типы положительных ионов не учитывались при определении эффективного заряда Солнца.

1. Pannekoek, A., Ionization in stellar atmospheres, Bull. Astron. Inst. Neth., 1, 107, 1922.
2. Rosseland S., Monthly Notices of the Royal Astr. Society, Vol. 84, No. 308, 1924, pp. 720-728.
3. Eddington A.S. The internal constitution of the stars. Cambridge Univ. Press, 1926.
4. Vysikaylo P.I., Korotkova M.A. J. Phys., Conf. Ser., 2018, vol. 1009, art. 012020.
5. J. S. Halekas, P. Whittlesey, D. E. Larson, D. McGinnis, M. Maksimovic, M. Berthomier, J. C. Kasper, A. W. Case, K. E. Korreck, M. L. Stevens, K. G. Klein, S. D. Bale, R. J. MacDowall, M. P. Pulupa, D. M. Malaspina, K. Goetz, and P. R. Harvey. Electrons in the Young Solar Wind: First Results from the Parker Solar Probe https://arxiv.org/abs/1912.02216v1

ИОННЫЙ СОСТАВ ЖЕЛЕЗА В ПОТОКАХ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В КОРОНЕ СОЛНЦА И ГЕЛИОСФЕРЕ

Горяев Ф.Ф., Слемзин В.А., Родькин Д.Г.

ФИАН РАН, г. Москва, Россия, goryaev_farid@mail.ru

Наблюдения распределений ионов Fe по стадиям ионизации в плазме солнечного ветра (СВ) дают ценную информацию о процессах нагрева в источниках СВ на Солнце. Обычно для характеристики этих распределений в качестве параметра используется средний заряд ионов Fe, Q_{Fe} . В статье Goryaev et al. (2020) была рассмотрена связь между параметром Q_{Fe} и соответствующими распределениями ионов Fe по данным прибора PLASTIC, установленного на борту космического аппарата STEREO, за период с января 2010 по июль 2011. Для более детального анализа формы распределений в [1] был определен параметр q12 (см. ниже), равный доле высокозарядных состояний в распределении ионов Fe в плазме СВ. В настоящей работе, в развитие идей [1], определяются три параметра q4, q8, q12, соответствующие условно «холодной», «средней» и «горячей» частям распределения ионов Fe в СВ, соответственно:

$$q4 = \frac{\sum_{0\le Z\le 7} n_z}{\sum_{0\le Z\le 20} n_z},\ q8 = \frac{\sum_{8\le Z\le 11} n_z}{\sum_{0\le Z\le 20} n_z},\ q12 = \frac{\sum_{12\le Z\le 20} n_z}{\sum_{0\le Z\le 20} n_z},\ q4+q8+q12 = 1\,.$$

где n_Z соответствует плотности ионов с зарядом Z. Дифференциация распределения ионов Fe по параметрам q4, q8, q12 позволяет извлечь более детальную информацию о состоянии в плазме СВ.

При прохождении плазмы СВ через корону ее ионный состав эволюционирует в процессе изменения температуры, плотности и скорости и в конце концов «замораживается» на расстояниях порядка нескольких солнечных радиусов от поверхности Солнца. В этой работе рассматривалось событие, связанное с межпланетным корональным выбросом массы (МКВМ) 18 августа 2010 г. и с сопутствовавшей эрупции вспышкой C4.5 (04:45-09:30 UT). Потоки СВ, связанные с этой эрупцией, наблюдались с 20 по 25 августа приборами STEREO-A. На основе введенных параметров q4, q8, q12 мы моделируем зарядовое распределение ионов Fe в СВ от источника до области «замораживания» на разных стадиях эрупции и сравниваем с наблюдаемыми параметрами у Земли. Для анализа МКВМ события рассматривалось 4 интервала времени в период с 19 августа по 25 августа 2010 г.: (1) до-эруптивный поток СВ, (2) эрупция, соответствующая прохождению МКВМ, (3) пост-эруптивный поток СВ, и (4) вернувшийся в до-эруптивное состояние поток СВ.

Для КВМ события 18 августа 2010 г. было проведено численное моделирование эволюции ионного состава Fe. Сравнение модельных распределений ионов Fe с измеренными для 4-х указанных интервалов времени показало очень хорошее согласие. Исключение составляют только участки распределений, соответствующие высоко-зарядовым состояниям $Z \ge 16$, для всех 4-х временных интервалов, особенно для 2-го, связанного с МКВМ. Для этих участков модельные распределения заметно переоценивают зарядовые состояния с $Z \ge 16$. Это, по-видимому, связано с переоценкой высокотемпературной части дифференциальной меры эмиссии (ДЭМ), по которой определяется температура плазмы. Рассчитанные по модельным распределениям параметры q4 и q8 также хорошо согласуются с измеренными (в пределах ошибок измерений), тогда как параметр q12 переоценен примерно в 2 раза.

1. Goryaev F., Slemzin V., Rodkin D. // *ApJ. Lett.* 2020. V. **905.** L17.
2. Slemzin V.A., Goryaev F.F., Rodkin D.G. // *ApJ.* (submitted).

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СПЕКТРЫ НАДТЕПЛОВЫХ ИОНОВ ^{4}He, C, O, Fe НА 1 а.е. В ПОТОКАХ ЧАСТИЦ ИЗ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР В 23 И 24 ЦИКЛАХ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Зельдович М.А., Логачев Ю.И.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ms.zeldovich@mail.ru

Изучались энергетические спектры надтепловых ионов с энергиями 0.04–2 МэВ/нуклон в потоках частиц из приэкваториальных корональных дыр (КД) в 2006–2012 гг. и в 2015-18 гг. Были использованы данные приборов SWICS и ULEIS, установленных на к.а. ACE. Проведено сравнение величин относительного содержания тепловых ионов He/O, C/O и Fe/O (SWICS) с содержанием надтепловых ионов ^{4}He/O, C/O, и Fe/O (ULEIS) в потоках частиц из КД на спаде активности в 23 и 24 циклах. Показано уменьшение этих величин с увеличением скорости солнечного ветра (СВ), в то время как интенсивность надтепловых ионов из КД возрастала со скоростью СВ. Энергетические спектры надтепловых ионов из изучавшихся КД были аппроксимированы либо степенной функцией (с показателем γ) либо комбинацией степенной и экспоненциальной функций. При аппроксимации 98 спектров получены значения $2 < \gamma < 6$, что, возможно, означает разные условия в областях ускорения ионов в потоках из КД. Предварительные результаты показали, что наиболее крутые спектры ионов наблюдались в потоках частиц на первых оборотах долгоживущих КД. Изучение спектров подтвердило увеличение интенсивности надтепловых ионов ^{3}He, ^{4}He, C, O и Fe с увеличением скорости СВ. Полученные результаты данной работы позволяют сделать вывод, что надтепловые ионы из КД представляют собой высокотемпературный «хвост» солнечного ветра.

ЕЩЁ РАЗ О 2D и 3D УРАВНЕНИЯХ ДЛЯ ОПИСАНИЯ МОДУЛЯЦИИ ГКЛ

Калинин М.С., Крайнев М.Б.

Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, г. Москва, Россия,
e-mail: *kalininms@lebedev.ru*

Ранее в работе (1) нами была предложена методика редукции трёхмерного (3D) по пространственным координатам (r,θ,φ) транспортного уравнения для функции распределения ГКЛ $\tilde{U}(r,\theta,\varphi,P)$, где P – импульс частиц, к двумерному (2D) уравнению для усреднённой по долготе функции распределения U(r,θ,P). Это 2D уравнение содержало, помимо обычных членов с усреднёнными по долготе коэффициентами (например, скоростью солнечного ветра и скоростью дрейфа частиц), также член источника Q, зависящий от долготных вариаций коэффициентов 3D уравнения и функции распределения ГКЛ $u = \tilde{U} - U$ В работе (2) для случая, когда единственным зависящим от долготы фактором является полярность гелиосферного магнитного поля, на основании теоретического анализа поведения градиента u (без решения 3D уравнения) была предложена оценка члена источника (Q2) и сформулировано замкнутое 2D уравнение, полученное путём редукции полного 3D уравнения модуляции ГКЛ по долготе. В работе (3) была сделана численная оценка члена источника (Q1) замкнутого 2D уравнения на основе решения полного 3D уравнения. Количественное сравнение Q1 и Q2 показало их существенное отличие, хотя структура некоторых составляющих качественно аналогична. Основной причиной неудовлетворительного результата сравнения оценок Q1 и Q2 мы считаем различные выражения для скорости дрейфа частиц вдоль гелиосферного токового слоя, использованные для этих оценок – распределённая в слое толщиной два ларморовских радиуса скорость дрейфа для оценки Q1 и сконцентрированная только на токовом слое скорость дрейфа для оценки Q2.

В данной работе мы обсуждаем результаты анализа поведения градиента долготной вариации функции распределения для случая распределённой в пространстве скорости дрейфа частиц вдоль гелиосферного токового слоя с целью уточнения оценки члена источника редуцированного 2D уравнения.

Литература:

1. Kalinin M.S., Krainev M.B., On the 2D and 3D cosmic ray transport equations // Proc. 24th ICRC, 4, 688, 1995
2. Калинин М.С., Крайнев М.Б. Двумерное транспортное уравнение для галактических космических лучей как следствие редукции трёхмерного уравнения // Геомагн. аэрон., 2014, т. 54(4), 463-469
3. M.S. Kalinin, B.B. Gvozdevsky, M.B. Krainev, O.P.M. Aslam, M.D. Ngobeni and M.S. Potgieter On the transition from 3D to 2D transport equations for a study of long-term cosmic-ray intensity variations in the heliosphere // POS(ICRC 2021)1323.

КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ЯВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В 2021 ГОДУ. СВЯЗЬ МАГНИТНЫХ БУРЬ С МЕЖПЛАНЕТНЫМИ ДРАЙВЕРАМИ.

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

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

Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра (СВ), расположенный на сайте http://www.iki.rssi.ru/omni/ (ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni), дополнен результатами идентификации различных типов СВ за 2021 год. Идентифицированы 3 типа квазистационарных потоков СВ: гелиосферный токовый слой (HCS), высокоскоростные потоки (HSS) из корональных дыр и медленные потоки из корональных стримеров, и 5 возмущенных типов СВ: области сжатия перед быстрыми потоками HSS (CIR), межпланетные проявления выброса корональной массы (ICME), которые могут включать в себя магнитные облака (MC) и Ejecta с областями сжатия Sheath (SHEmc и SHEej соответственно), предшествующие им, а также межпланетная ударная волна (IS). Для идентификации крупномасштабных явлений СВ использовались часовые данные различных параметров базы OMNI2 (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni). Подготовлен список магнитных бурь Dst <= -50 нТл за период 1976 по 2021гг с идентификацией типа СВ в начале главной фазы и в ее минимуме.

Предварительный анализ показывает, что динамика солнечного ветра и, как следствие, динамика магнитосферных возмущений в первые 2 года 25-го солнечного цикла развиваются по сценарию, похожем на аналогичные периоды 23 и 24 солнечных циклов эпохи ослабленного солнечного ветра (Yermolaev et al., JGR, 2021).

Статистический анализ величин и вариаций углов направления потока для различных типов солнечного ветра

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

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, mosanas6@yandex.ru

Данная работа посвящена статистическому анализу отклонений вектора потока ионов солнечного ветра от радиального направления, а также его вариабельности на разных масштабах в различных крупномасштабных типах течения солнечного ветра.

Рассматриваются долготный φ и широтный θ углы направления потока, вычисленные из компонент скорости солнечного ветра по данным космического аппарата WIND (прибор 3DP). Для рассмотрения вариаций вектора потока на различных пространственных масштабах используются усреднения на длинах интервалов от 30 до 3600 секунд. Отбор интервалов для разных типов солнечного ветра проводился на основе каталога крупномасштабных явлений http://iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/ [Ермолаев и др.,2009].

Рассмотренные длины интервалов позволяют охватить широкий диапазон пространственных масштабов. Известно, что на масштабах > 1 ч могут происходить сильные отклонения вектора скорости при столкновении крупномасштабных потоков солнечного ветра, на масштабах ~ 1 ч резкие изменения направления могут быть связаны с пересечением границ потоковых трубок [Borovsky, JGR, 2008], а на масштабах < 1 минуты могут возникать кратковременные отклонения вектора потока за счет локальных процессов в плазме солнечного ветра [Застенкер и др., КИ, 2015].

По результатам статистического анализа показано, что значения модуля долготного (φ) и широтного (θ) углов, их вариаций, а также вероятность значительных отклонений от радильного направления (более 5˚) достигают максимальных значений в областях взаимодействия потоков SHEATH и CIR (области между медленным квазистационарным солнечным ветром и высокоскоростными потоками, ассоциированными с корональными выбросами массы или быстрым ветром из корональных дыр соответственно).

Данная работа является продолжением исследования (Москалева и др., 2021). В дополнение к предыдущим результатам рассмотрены вариации углов направления вектора потока солнечного ветра на промежуточных длинах интервалов: 90, 300, 900 и 1800 секунд (ранее были рассмотрены только длины интервалов 30 и 3600 секунд) и построены зависимости степени вариабельности углов от их масштаба.

1. Москалева А.В., Рязанцева М.О., Ермолаев Ю.И., Лодкина И.Г. Вариации направления потока в различного типа течениях солнечного ветра. Солнечно-земная физика, 2021, 7 (4), https://doi.org/10.12737/szf-74202102
2. Застенкер Г.Н., Храпченков В.В., Колоскова И.В. и др. Быстрые вариации величины и направления потока ионов солнечного ветра, Космические исследования, 2015, т. 53, № 1, с. 63-74, DOI:10.1134/S0010952515010098
3. Borovsky J. E. The flux-tube texture of the solar wind: Strands of the magnetic carpet at 1 AU?, Journal of Geophysical Research, 2008, 113, A08110, DOI:10.1029/2007JA012684.
4.Ермолаев Ю.И., Николаева Н.С., Лодкина И.Г., Ермолаев М.Ю. Каталог крупномасштабных явлений солнечного ветра для периода 1976–2000, Космические исследования, 2009, т. 47, № 2, с. 81–94.

Анализ частотных спектров вариаций космических лучей, параметров солнечной активности и межпланетной среды в 20 – 24 циклах солнечной активности

Охлопков В.П.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ovpetrovich@yandex.ru

Используя метод спектрального анализа исследованы периодичности по данным космических лучей (КЛ) в стратосфере, в нейтронной компоненте, в различных параметрах солнечной активности (СА) и межпланетной среды за период с 1965 по 2020 год отдельно по циклам солнечной активности.

Исследование квазипериодичностей за длительный промежуток времени, включающий 4 цикла СА, позволило выявить особенности частотных спектров в сочетаниях четный-нечетный циклы и сохранение этих особенностей в следующей паре циклов четный-нечетный. При этом выделены наиболее устойчивые квазипериодические компоненты в каждом цикле как в потоках КЛ, так и в параметрах солнечной активности и межпланетной среды.

Проявления квазидвухлетней периодичности в КЛ, четко присутствующей и в среднем магнитном поле Солнца как звезды (СМП) и синхронно изменяющей свой период в этих параметрах от цикла к циклу, свидетельствует о связи этой периодичности в КЛ с СМП. Квазидвухлетняя периодичность в четных и нечетных циклах различается по длительности примерно на 2 месяца. В отличие от квазидвухлетней вариации период годовой вариации и вариации с T = 9.1 – 10 в четных циклах меньше, чем в нечетных. Квазипериодичность с T = 15 - 16 месяцев проявляется в четных циклах. Остальные более высокочастотные вариации не проявляют выраженно эффект изменения периода в цикле четный-нечетный. Таким образом, мы видим проявление 22-летнего цикла в длительности периодичностей. Хорошо известен 22-летний цикл в СА, в котором особыми свойствами обладают 11-летние циклы СА в сочетании четный-нечетный циклы [1], в частности, это проявляется в относительных высотах циклов в парах четный-нечетный, в промежутках между максимумами 11-летних циклов, в формах кривых временного хода циклов. Все это не могло не сказаться на частотных спектрах.

1. Витинский Ю.И., Копецкий М., Куклин Г.В., Статистика пятнообразовательной деятельности Солнца, Москва, «Наука», 1986.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛАЗМЕННЫХ ПОТОКОВ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ С ПОМОЩЬЮ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ МЕРЫ ЭМИССИИ

Родькин Д.Г., Слемзин В.А., Горяев Ф.Ф.

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия, rodkindg@gmail.com

При изучении формирования корональных выбросов массы (КВМ) в солнечной короне важную информацию дает спектроскопическая диагностика плазменных потоков с помощью дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ), которая описывает наиболее вероятное распределение по температуре меры эмиссии плазмы, определяемое по измеренным интенсивностям вакуумно-ультрафиолетового (ВУФ) излучения. Наиболее точные значения ДМЭ получаются для плазменных потоков в случае эрупции на лимбе, т.к. отсутствует фон от диска. При этом важна коррекция рассеянного света, влияние которого растет из-за экспоненциального спада интенсивностей с высотой.

В настоящей работе ДМЭ анализ был применен для события 18 августа 2010, в котором в активной области АО 11093 произошел мощный КВМ, видимый с Земли на западном лимбе и зарегистрированный приборами на нескольких космических аппаратах (SOHO/LASCO, SDO/AIA, STEREO-A/EUVI). Анализ изображений короны в ВУФ и в коронографах показал, что КВМ сформировался из нескольких дискретных потоков плазмы, после чего продолжалось истечение плазмы в виде непрерывного пост-эруптивного потока [1].

Предварительно был проведен анализ интенсивностей в надлимбовой области короны на влияние рассеянного света и разработан алгоритм его коррекции с помощью специально подобранных функций рассеяния точки. По изображениям SDO/AIA было рассчитано температурное распределение ДМЭ (использован метод Плоумана [2]) и определены параметры плазмы (мера эмиссии, плотность и температура) в области выброса до его начала, при формировании КВМ и для пост-эруптивного потока.

Расчёты проводились для 3-х температурных диапазонов: 1) «холодного» - $log_{10}T$ = 5.5 – 6.3; 2) «среднего» - $log_{10}T$ = 6.3 − 6.8; и 3) «горячего» - $log_{10}T$ = 6.8 − 7.2. Наибольшая мера эмиссии (МЭ) наблюдалась до начала эрупции (04:00 UT). Во время выброса (05:20 - 05:25 UT) МЭ сильно изменилась (на порядок) на «среднем» и «горячем» температурных диапазонах из-за потока плазмы из области димминга. В «холодном» диапазоне значение МЭ понизилось менее, чем в 3 раза. Такое малое падение можно объяснить тем, что присутствовал дополнительный приток холодной плазмы за счет пересоединения между холодными петлями и открытыми силовыми линиями магнитного жгута, а также перетеканием вещества холодного филамента в сторону эрупции. После эрупции (10:00 UT) плотности всех частей плазмы упали из-за ухода вещества КВМ из солнечной короны.

В дальнейшем, полученные путем ДМЭ анализа параметры плазмы были использованы при моделировании ионного состава солнечного ветра [3].

1. Слемзин В.А., Родькин Д.Г., Горяев Ф.Ф. // Эруптивные и постэруптивные потоки плазмы в короне и солнечном ветре. 17-я конференция «Физика плазмы в солнечной системе». 7-11 февраля 2022, ИКИ РАН.
2. Plowman J., Caspi A. // ApJ. 2020. 905:17.
3. Горяев Ф.Ф., Слемзин В.А., Родькин Д.Г. // Ионный состав железа в потоках солнечного ветра в короне и гелиосфере. 17-я конференция «Физика плазмы в солнечной системе». 7-11 февраля 2022, ИКИ РАН.

ЭРУПТИВНЫЕ И ПОСТЭРУПТИВНЫЕ ПОТОКИ ПЛАЗМЫ В КОРОНЕ И СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

Слемзин В.А., Родькин Д.Г., Горяев Ф.Ф.

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

Прогнозирование транзиентных возмущений солнечного ветра (СВ), связанных с распространением корональных выбросов массы (КВМ) состоит в предсказании прихода в точку наблюдения фронта КВМ и его скорости. Длительность связанного с КВМ магнитно-плазменного возмущения СВ, определяемого как межпланетный корональный выброс массы (МКВМ), для одиночных событий составляет, в среднем, от 26 до 32 часов [1,2]. В то же время, после МКВМ часто наблюдается длительный участок возмущенного СВ, в котором скорость протонов постепенно спадает до фонового значения, и общая длительность транзиента может доходить до нескольких суток [3], а его длина может составлять более 0,5 а.е. Согласно модели DBM (Drag-based model, [4]), скорость КВМ в гелиосфере изменяется вследствие магнитодинамического взаимодействия магнитного жгута с фоновым СВ согласно соотношению: $dV/dt= -\gamma\cdot(V-w)\cdot|V-w|$, где V и w – скорость КВМ и фонового СВ, γ - параметр взаимодействия. В случаях взаимодействия в гелиосфере двух и более КВМ, возмущенный СВ от предыдущего КВМ является фоновым для следующего, что приводит к изменению параметров его движения и может вызвать ошибку в прогнозировании времени и скорости его прихода в точку наблюдения. В настоящей работе на примере события 18 августа 2010 г. была изучена возможная связь возмущения СВ после МКВМ с постэруптивным потоком плазмы из области эрупции. Эрупция произошла одновременно со вспышкой GOES C4.5 (04:45-09:30 UT), и наблюдалась на западном лимбе Солнца телескопом SDO/AIA, коронографами LASCO C2 и C3, а также в перпендикулярном направлении телескопом STEREO-A/SECCHI EUVI. Связанные с этой эрупцией потоки СВ наблюдались с 20 по 25 августа на STEREO-A. Обработка полярных изображений коронографов C2 и C3 с помощью диаграмм «время-высота» выявила на высоте 2-20 Rsun последовательность из 5ти дискретных потоков плазмы, сформированных во время вспышки, и постэруптивного непрерывного потока, продолжающегося после окончания вспышки. С помощью базовой DBM были рассчитаны времена и скорости прихода потоков к STEREO-A. Минимальные отклонения от измеренных параметров показали расчеты, в которых для головного потока в качестве фоновой использовалась скорость медленного СВ до эрупции, а для остальных потоков – среднее значение между конечной скоростью головного потока в точке наблюдения и скоростью фонового СВ до эрупции. Значения γ=0.3 для фронта КВМ и 0.12 для остальных потоков были установлены по наименьшему расхождению рассчитанных скоростей с измеренными и соответствуют движению этих потоков по магнитному каналу, открытому фронтальной структурой. В пределах точности расчета по времени и скорости приход дискретных потоков соответствовал МКВМ, а приход диффузного потока совпал с постэруптивным потоком возмущенного СВ. Это соответствие было подтверждено совпадением модельного зарядового распределения ионов Fe в СВ на выходе из короны с измеренным *in-situ* в СВ на разных стадиях эрупции [5]. Таким образом установлено, что поток возмущенного СВ после МКВМ связан с непрерывным потоком плазмы, вышедшим из короны после основной эрупции и вспышки, и его скорость может быть рассчитана с помощью модели DBM в предположении его движения в гелиосфере по магнитному каналу, открытому головным потоком КВМ.

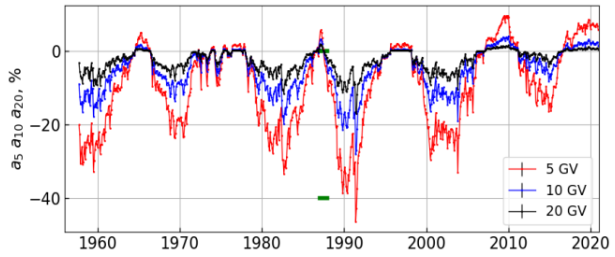
1. *Richardson I.G., Cane H.V.* // Solar Phys. 2010. V. 264. P. 189.
2. *Слемзин и др.* // *ФИЗИКА ПЛАЗМЫ, 2019, Т.45, № 10, с. 867.*
3. *Temmer et al.* // *ApJ. 2017. V. 835. P. 141*
4. *Vrsnak, B.// Journal of Space Weather and Space Climate. 2021. V.11. P. 34.*
5. *Горяев Ф.Ф. Ионный состав Fe в потоках солнечного ветра в короне и гелиосфере. Доклад на 17 конференции «Физика плазмы в солнечной системе»*

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ РАЗНОЙ ЭНЕРГИИ В МИНИМУМАХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Янке В.Г., Белов А.В., Гущина Р.Т.

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

Тренд глобального магнитного поля Солнца - основного параметра, модулирующего космические лучи (КЛ) - наблюдаемый с конца 22-го цикла солнечной активности (СА), приводит к тренду характеристик СА и гелиосферного поля. В работе рассматривается вопрос об отклике на длительное ослабление общего магнитного поля Солнца в долговременной модуляции КЛ разной энергии в циклах СА с разным направлением полярного магнитного поля Солнца. Анализируется период 1991-2020, включающий два интервала с положительным и отрицательным направлениями глобального магнитного поля Солнца. Исследование выполнено на материале непрерывных наблюдений КЛ сетью нейтронных мониторов, телескопов и стратосферных шаров-зондов. Спектр вариаций КЛ для частиц с эффективной жесткостью R_{eff}=5, 10, 20 ГВ определен с помощью разработанного нами варианта метода глобальной съемки (база 1987). В минимуме 24/25 цикла СА в вариациях КЛ наблюдается, начиная с 2018 г. до настоящего времени, плоский (подтверждая дрейфовую теорию модуляции для A>0) максимум потока КЛ. В этот период вариации КЛ малых энергий (наблюдаемые на КА и в стратосфере) превышают значение вариаций базового периода на ~8% и составляет 0.8 от вариаций КЛ в аномальном минимуме 23/24 в 2009г. Максимум потока частиц средних и высоких энергий, наблюдаемых на нейтронных мониторах и телескопах на 1-2% ниже максимума 23/24 (рис.1, а - вариации КЛ с R_{eff}=5, 10, 20 ГВ). Пониманию процесса модуляции КЛ электромагнитными полями гелиосферы способствует моделирование вариаций КЛ. В предложенной нами многопараметрической модели долгопериодная модуляция КЛ описывается (с учётом запаздывания) следующими характеристиками: средней напряженностью поля на Солнце B_{ss}, наклоном гелиосферного токового слоя *hcst*, полярным магнитным полем H_{pol}, совместно с учётом влияния спорадических солнечных явлений (через CME-индекс) и площадью корональных дыр.



Временные изменения вариаций КЛ (%, 1987) для 5, 10, 20 ГВ.

Из модельных расчетов для анализируемых трех временных интервалов получены наблюдаемые и ожидаемые вариации КЛ и вклады в модель модуляции от изменений перечисленных солнечно-гелиосферных характеристик. Показано: восстановленный поток КЛ в минимуме 24/25 ниже, чем в 23/24 и наблюдается зависимость уровня восстановления от энергии частиц; для периода 2014-2020 A>0 основную роль в создание модуляции КЛ для R=5 ГВ играют среднее магнитное поле B_{ss} и наклон токового слоя *hcst* (с одинаковой величиной вклада в модуляцию). Для частиц с жесткостями 10 и 20 ГВ при общей малой амплитуде вариаций в этот период вклад от влияния на модуляцию CME индекса несколько превышает соответствующий вклад в другие периоды.

В минимуме 24/25 выявлено уменьшение влияния угла наклона токового слоя *hcst* на модуляцию КЛ. Изменение его величины происходит в тех же пределах, что и в других циклах, но эффективность воздействия на модуляцию сильно снижена. В 24-ом и начале 25-ого цикла СА в общей модуляции КЛ преобладает воздействие на КЛ среднего магнитного поля на Солнце, выраженного в индексе B_{ss}, несмотря на снижение самой величины B_{ss}.

Работа базируется на экспериментальных данных УНУ "СЕТЬ СКЛ".

СОГЛАСОВАННАЯ ДИНАМИКА ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ПОТОКОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ 26.10-11.11 2015 г.

Калегаев В.В.[1,2], Власова Н.А.[1], Ефимкина Е.И.[2], Назарков И.С.[1]

1 МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ, Москва, Россия, klg@dec1.sinp.msu.ru
2 МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Солнечный ветер и межпланетное магнитное поле оказывают постоянное и активное воздействие на магнитосферу, изменяя ее структуру. Состояние популяций захваченных частиц связано с геомагнитной активностью и тоже изменяется под внешним воздействием. Динамика потоков захваченных заряженных частиц определяется структурой магнитного поля, а движение частиц, в свою очередь, формирует буревые крупномасштабные токовые системы, изменяющие величину и структуру геомагнитного поля. Согласованная динамика геомагнитного поля Земли и потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса исследована в период продолжительной геомагнитной активности 26.10 – 11.11 2015 г. на основе экспериментальных данных измерений потоков электронов и геомагнитного поля на геостационарной орбите (ИСЗ GOES) и на высокоэллиптической орбите, проходящей через сердцевину радиационных поясов (ИСЗ Van Allen Probes). Рассмотрены три умеренные геомагнитные бури 01.11, 03-04.11 и 07.11 с $|Dst|_{max}$ ~40, ~60 и ~90 нТл, соответственно. Развитие бурь происходило под воздействием разнообразных условий в межпланетном пространстве. Существенное возрастание потока релятивистских электронов наблюдалось только в результате бури 03-04.11.2015, начало которой связывается с достаточно мощным импульсом давления солнечного ветра, а часть главной фазы бури проходила в условиях северной ориентации межпланетного магнитного поля. Рост потоков электронов наблюдался в условиях преимущественно южной ориентации межпланетного магнитного поля и высокой скорости солнечного ветра.

Показано, что основными факторами, определившими динамику потоков электроновстали расширение (сокращение) дрейфовых оболочек (Dst-эффект) [1] и магнитная диффузия под действием внезапных импульсов магнитного поля [2]. Результаты сравнительного анализа динамики потоков электронов и вариаций геомагнитного поля свидетельствуют о согласованной динамике потоков электронов и геомагнитного поля не только в сердцевине радиационных поясов Земли, как показано в работе [3], но и в области геостационарной орбиты.

1. McIlwain C.E. // J. Geophys. Res. V. 71. P. 3623–3628. 1966.
2. Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 224 с. 1968. (Основы теоретической космофизики. Избранные труды. М.: УРСС. 336 с. 2004.)
3. Власова Н.А., Калегаев В.В., Назарков И.С. // Геомагнетизм и аэрономия. 2021. Т. 61. № 3. С. 316-326. DOI:10.31857/S0016794021030184

Возрастания дозы во внешнем радиационном поясе по данным прибора ДЭПРОН

Золотарев И.А., Бенгин В.В., Юшков Б.Ю., Нечаев О.Ю., Антонюк Г.И.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, zolotarev@sinp.msu.ru

Явление возрастаний потоков релятивистких электронов во внешнем радиационном поясе (ВП) описано в начале 1970х годов [1]. Далее это явление было подробно изучено [2] и анализировалась связь с 30-120 кэВ протонами. Проводились одновременные эксперименты в космосе и на аэростатах нацеленные на исследование процессов потерь релятивистких электронов [3] Также возрастания потоков релятивистких электронов были изучены с помощью дозиметрических приборов [4].

Для изучения явлений возрастаний потоков частиц по результатам работы дозиметра ДЭПРОН создан каталог графических материалов. Каталог содержит графики дозы и потоков зараженных частиц каждого пересечения ВП. Каталог за 1-9 января 2017 года анализировался экспертом и визуально были отобраны графики, содержащие возрастания. Из 523 пересечений ВП 24% содержат возрастания.

В помощь эксперту был создан алгоритм, позволяющий автоматически найти возрастания дозы длительностью до 20 с. Результаты работы алгоритма сопоставлялись с отбором эксперта. Алгоритм успешно определяет положение 77% возрастаний.

1. Thorne R.M., Kennel C.F. // J. Geophys. Res. 1971. V. **76**. № 19. P. 4446–4453.
2. Imhof W.L. et al. // J. Geophys. Res. 1986. V. **91**. № A3. P. 3077.
3. Millan R.M. et al. // Space Sci. Rev. 2013. V. **179**. № 1–4. P. 503–530.
4. Dachev T.P. // J. Atmos. Solar-Terrestrial Phys. 2018. V. **177**. № April. P. 247–256.

ОЦЕНКА ВКЛАДА РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ В УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ДО РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭНЕРГИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ ARASE, GOES

Белаховский В.Б.[1], Пилипенко В.А.[2], Антонова Е.Е.[3,4], Миоши Е.[5]

[1] – *Полярный геофизический институт, г. Апатиты*
[2] – *Институт физики Земли РАН, г. Москва*
[3] – *Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва*
[4] – *Институт космических исследований РАН, г. Москва*
[5] – *Институт исследования околоземного космического пространства, г. Нагоя, Япония*

E-mail: belakhov@mail.ru

Выделение основных механизмов ускорения электронов до релятивистских энергий (несколько МэВ) во внешнем радиационном поясе Земли продолжает оставаться одним из актуальных проблем физики магнитосферы. В работе исследованы вариации потоков релятивистских электронов и волновой активности с целью определения вклада каждого из предложенных механизмов ускорения. Анализируются вариации УНЧ и ОНЧ волновых возмущений. Регистрация потоков электронов осуществлялась по данным геостационарных спутников GOES и японского спутника Arase (ERG). Для характеристики ОНЧ волновой активности в магнитосфере использованы данные спутников Arase, инструмент PWE. Использован ULF индекс, разработанный в ИФЗ РАН, для характеристики волновой активности магнитосферы в Pc5 диапазоне. Рассмотрены случаи без магнитных бурь с высокой скоростью солнечного ветра и интервалы с магнитными бурями.

Основной особенностью действия различных механизмов ускорения является рост потоков релятивистских электронов на 1.5-2 порядка через 1-3 дня после роста УНЧ индекса, роста мощности ОНЧ излучений. Анализ показывает, что рост ОНЧ и УНЧ волновой активности происходит примерно в одно время и совпадает с ростом суббуревой активности. Поэтому разделить по времени вклад данных механизмов ускорения достаточно не просто. Показано, что в рассмотренных событиях величины потоков релятивистских электронов во время магнитных бурь (со средней скоростью солнечного ветра) больше, чем для интервалов без магнитных бурь с высокой скоростью солнечного ветра, что может свидетельствовать о действии УНЧ механизма ускорения [1, 2] без магнитных бурь. Во время магнитных бурь максимум интенсивности потоков смещается на более низкие L-оболочки по сравнению с интервалами без магнитных бурь. Его положение хорошо соответствует кривой Тверской [3], и может эффективно работать механизм ускорения, связанный с инжекцией электронов в область магнитного поля, ослабленного кольцевым током, и их последующего бетатронного ускорения при восстановлении магнитного поля. Обсуждаются преимущества и недостатки различных механизмов ускорения.

1. Elkington S.R. et al. // Geophys. Res. Lett., Vol. 26, p. 3273-3276, 1999.
2. Pilipenko V. Et al. // Adv. Space Res., Vol. 37, № 6. p. 1192-1205, 2006.
3. Tverskaya L.V. Dynamics of energetic electrons in the radiation belts, in: "Radiation Belts: Models and Standards". Geophysical Monograph 97. AGU. p.183. 1996.

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

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В ДЕКАБРЕ 2021 ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ «МЕТЕОР-М» И «АРКТИКА-М»

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

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

Оперативный контроль радиационных условий в околоземном космическом пространстве (ОКП) позволяет выявлять и анализировать изменения, происходящие структуре радиационных поясов Земли (РПЗ) в режиме близком к онлайн. Ключевой в данном случае является информация, поступающая с космического аппарата (КА) «Арктика-М», запущенного на высокоэллиптическую орбиту типа «Молния» 28 февраля 2021 года, позволяющая отслеживать вариации внешнего РПЗ в его «сердцевине». Также мы используем данные КА, имеющих круговые полярные орбиты, проходящих последовательно разные L-оболочки четыре раза за виток. На сегодняшний день среди российских КА такими являются КА серии «Метеор-М» и ряд сверхмалых КА типа кубсат (CubeSat).

В настоящей работе приводятся результаты анализа вариаций структуры электронов внешнего РПЗ в течение 2021 года по данным нового российского КА Арктика-М1, метеорологического КА Метеор-М2 и созданного в НИИЯФ МГУ сверхмалого кубсата Декарт. Помимо ожидаемых вариаций потоков и спектров электронов внешнего РПЗ во время геомагнитных бурь, происходивших в результате воздействия на магнитосферу Земли как высокоскоростных потоков солнечного ветра, так и корональных выбросов массы, было обнаружено, что в декабре 2021 года потоки РПЗ внешнего радиационного пояса имеют выраженный двойной максимум потоков релятивистских и суб-релятивистских электронов вблизи L=3.5 и L=4.8-5 (рис.1). Обсуждаются возможные причины данного феномена.

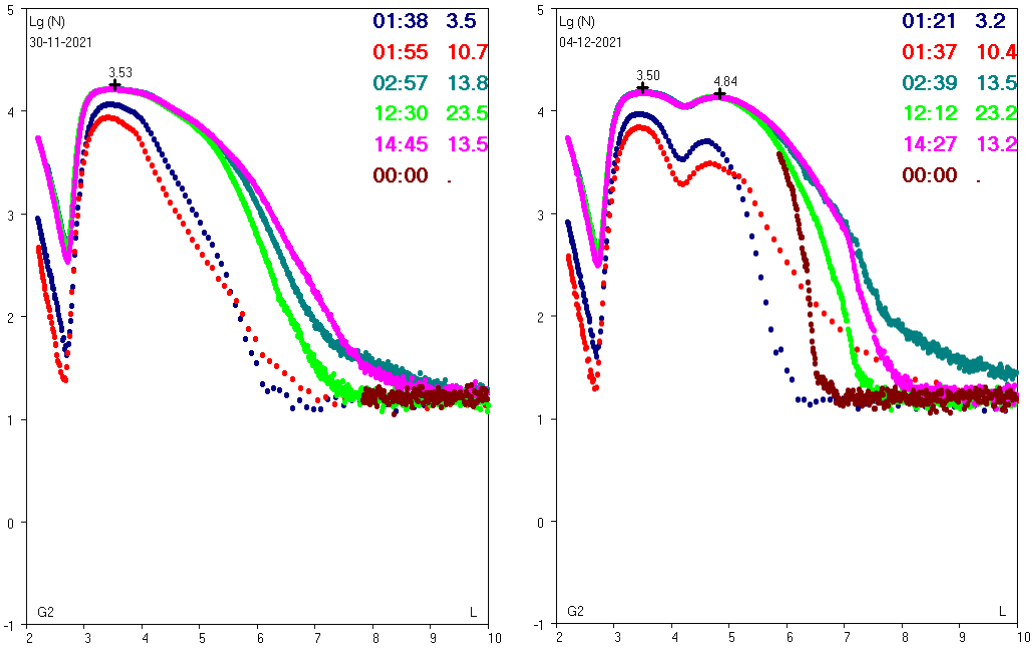


***Рис.1**. Профили потоков электронов с энергиями более 0.7 МэВ во внешнем РПЗ на орбите КА Арктика при невозмущенном солнечном ветре (левая панель) и после прихода высокоскоростного протока (правая панель). Числами слева показано время UT пересечения оболочек L=4 при высокоапогейных прохождениях аппарата через РПЗ, числа справа – локальное время.*

Аномальные возрастания потоков энергичных электронов в приэкваториальной области над районом Гавайских островов и над Северной Атлантикой.

Гинзбург Е.А., Писанко Ю.В.

Институт прикладной геофизики им. академика Федорова Е.К., Москва, Россия, e_ginzburg@mail.ru

Представлены данные по аномальным явлениям в магнитосфере. А именно, в период с 2014 по 2021 г. приборами на спутнике «Метеор-М» №2 были зарегистрированы 32 случая интенсивных возрастаний потоков энергичных электронов: 21 эпизод на широтах вблизи экватора при пролетах спутника в окрестностях географической долготы 180° в направлении из северного полушария в южное, над районом Гавайских островов и 11 эпизодов на долготе ~360° в северной Атлантике при движении спутника из южного полушария в северное.

В канале счетчика Черенкова (паспортный порог регистрации по электронам – 8 МэВ) каждое такое событие над Гавайями выглядело как импульс с резкими передним и задним фронтом и формой, близкой к прямоугольной (рис.1). Импульс в канале гейгеровского счетчика (Ee >0.7 MeV) выглядел, как относительно узкий пик квазигауссовой формы. Его максимум располагался в различных местах черенковского пика: вблизи переднего фронта, в центре и вблизи заднего фронта черенковского пика. Времена резкого начала всех импульсов одинаковые: 20:59:45 ± 12с, времена резкого окончания - от 21: 05:51 до 21:07:27 с такой же точностью.

Аналогичные свойства пиков наблюдались и в событиях над северной Атлантикой. Времена начала событий те же, что и при пролетах над Гавайями.

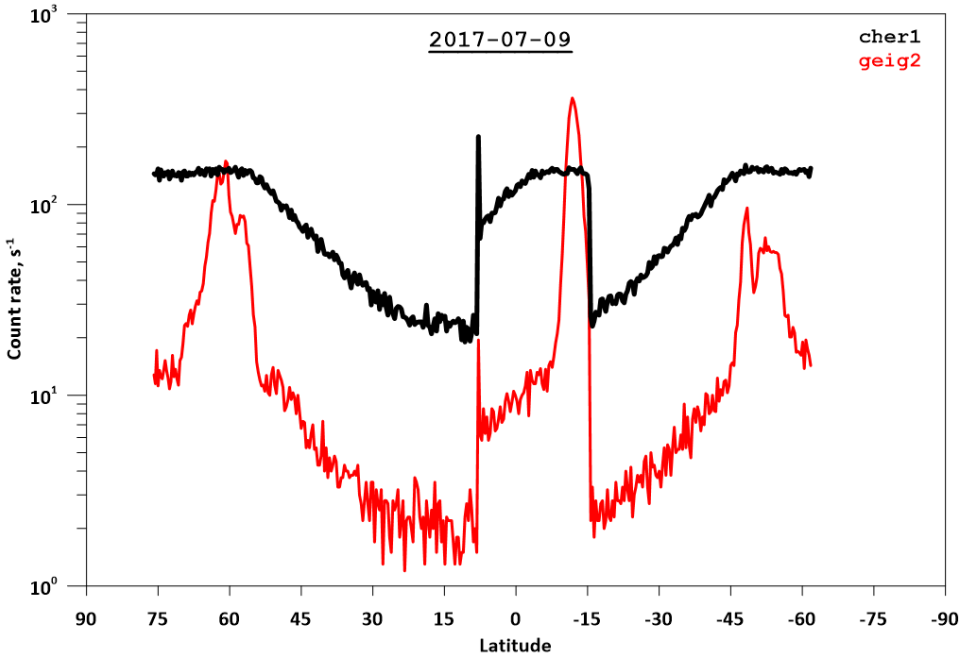


Рисунок 1 Аномальные возрастания потоков электронов в приэкваториальной области над районом Гавайских островов при пролете спутника из северного полушария в южное.

Анализ быстрых вариаций потоков электронов в области зазора методом нормированного размаха

Прохоров М.И., Богомолов В.В., Богомолов А.В., Июдин А.Ф., Калегаев В.В., Мягкова И.Н., Оседло В.И., Свертилов С.И.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия,
mishappro034@gmail.com

Потоки частиц, наблюдаемые на низких орбитах, не являются стационарными. Для этих потоков характерны вариации на различных временных масштабах. В частности, неоднократно фиксировались быстрые, субсекундные вариации потоков электронов. Например, в экспериментах на спутниках FireBird-2 такие вариации наблюдались на границе внешнего радиационного пояса Земли. В области зазора между внешним и внутренним радиационными поясами проводились исследования вариаций потоков релятивистских электронов на больших временных масштабах. В настоящей работе приводится исследование быстрых вариаций потоков электронов в области зазора.

Для изучения характера переменности этих потоков был применён метод нормированного размаха. Этот метод анализа временных рядов позволяет делать выводы о степени случайности временного ряда и о том, сохраняет ли временной ряд тренд или, наоборот, имеет тенденции к избыточной переменности на тех или иных масштабах. Использованный метод заключается в нахождении показателя Херста (H), описывающего зависимость усреднённого отношения накопленного размаха к стандартному отклонению на интервале ряда от длины интервала. На основании полученного H строятся выводы о характере переменности временного ряда. Для случайного (Пуассонового) процесса ожидается H=0.5. Значение H>0.5 свидетельствует о сохранении тренда ряда, а H<0.5 соответствует избыточной переменности ряда.

В работе проведен анализ показаний сцинтилляционного детектора электронов площадью 4 $см^2$, установленного на спутнике СириусСат. Для анализа использовались данные, записанные в формате пособытийной записи, содержащие информацию о времени каждого взаимодействия частицы в детекторе с точностью ~20 мкс. Это позволило проводить изучение вариаций потоков электронов суб-релятивистских энергий на суб-секундных временных масштабах. В четырех случаях из десяти значение показателя Херста указывает на избыточную переменность потоков в области зазора (L~2.3) к востоку от Южно-атлантической аномалии на характерных временах 0.6-0.9 с.

Работа выполнена при поддержке научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные космические исследования».

ДИНАМИКА ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА И ДАВЛЕНИЕ МАГНИТОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНЫХ БУРЬ (краткий обзор)

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

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

[2]*Институт Космических Исследований РАН*

[3]*University of Santiago de Chile*

[4]*Полярный Геофизический институт*

Суммированы результаты исследований формирования внешнего радиационного пояса (ВРП) и появления электронов - «киллеров спутников» во время магнитных бурь. Использованы данные многоспутниковых наблюдений, включая отечественные проекты. Показано, что результаты наблюдений требуют пересмотра традиционных подходов к описанию процессов ускорения и потерь электронов внешнего пояса. К таким результатам относятся пересечение области проекции аврорального овала на экваториальную плоскость и области ускорений электронов ВРП, определение характерного времени ускорения релятивистских электронов, выделение адиабатических эффектов падения и возрастания потоков релятивистских электронов, получение многочисленных подтверждений справедливости соотношения Л.В. Тверской, связывающего положение максимума, сформированного после бури ВРП с максимальной величиной модуля Dst/SYM-H вариации. Получили подтверждение ряд предсказаний теории формирования ВРП, основанной на анализе динамики давления магнитосферной плазмы во время магнитных бурь. Рассмотрена возможность использования данных наземных и спутниковых наблюдений для предсказания характеристик ВРП в конце фазы восстановления магнитной бури.

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОСФЕРЫ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА HD209458B, И КОМПЛЕКСНАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ

Шайхисламов И.Ф., Ходаченко М.Л., Мирошниченко И.Б., Руменских М.С., Березуцкий А.Г.

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

Используя глобальную трехмерную многожидкостную МГД-модель, мы смоделировали магнитосферу Горячего Юпитера HD209458b и рассчитали синтетические транзитные профили поглощения в линиях HI, OI, CII и метастабильного триплета гелия HeI (2^3S). Впервые изучено, как присутствие планетарного собственного магнитного поля изменяет профили поглощения. Трехмерное МГД моделирование показало [1], что магнитный дипольный момент μ=0.6 от юпитерианского значения, который создает магнитное поле величиной 1 Гс на экваторе планеты HD209458b, коренным образом меняет характер истечения верхней атмосферы. Общая скорость потери массы снижается в 2 раза, по сравнению с незамагниченной планетой. В частности, вокруг планеты формируются зоны стагнации и ветра с различным характером движения плазмы. 3D-МГД-моделирование также подтвердило результаты предыдущей 2D-МГД модели [2] в том, что убегающее планетарное вещество образует тонкий магнитодиск в экваториальной области вокруг планеты. Значительно сниженная скорость ветра вблизи планеты и особенно на ночной стороне приводит к более сильной фотоионизации элементов. и значительно более низким плотностям соответствующих поглощающих частиц. В целом пониженные скорости и более низкие плотности приводят к значительному уменьшению поглощения на линиях Lyα (HI), OI и CII, хотя поглощение в линии HeI (23 S) практически не меняется. Представленные результаты, адаптированные к доступным измерениям, показывают, что магнитное поле HD209458b должно быть как минимум на порядок меньше, чем у Юпитера. Этот вывод согласуется с предыдущими оценками, основанными на более упрощенных моделях и гораздо меньшем количестве данных наблюдений, основанных только на поглощение Lyα. Таким образом, проведенное исследование показало, что применение трехмерных МГД-моделей, расчитывающих течение верхних атмосфер горячих экзопланет и транзитное поглощение в доступных для измерений спектральных линиях различных элементов, чувствительные к динамике планетарной плазмы под действием магнитного поля, открывает способ исследования и количественной оценки экзопланетных магнитных полей.

Работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки России № 075-15-2020-780, также поддержана грантами РНФ № 18-12-00080, РФФИ 20-02-00520.

1. Khodachenko M. L. et al. //MNRAS 2021. V. 507. PP. 3626-3637.
2. Khodachenko M.L., Shaikhislamov I.F., Lammer H., et al. // ApJ 2015. V. **813**. P. 50.

НАБЛЮДЕНИЯ АВРОРАЛЬНЫХ ОМЕГА СТРУКТУР В МАГНИТОСФЕРЕ МНОГОСПУТНИКОВЫМИ МИССИЯМИ

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

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

В работе проанализированы сопряженные измерения авроральных омега структур в ионосфере (наземный сегмент THEMIS) и в магнитосфере спутниками THEMIS и MMS. В работе мы сравниваем портрет магнитосферного источника авроральных омега структур, полученный в глобальных МГД симуляциях, со спутниковыми наблюдениями. В частности, удается выделить плазменные структуры с существенно отличающейся концентрацией и температурой, которые могут являться следующей стадией эволюции нестационарных струйных течений (BBF).

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

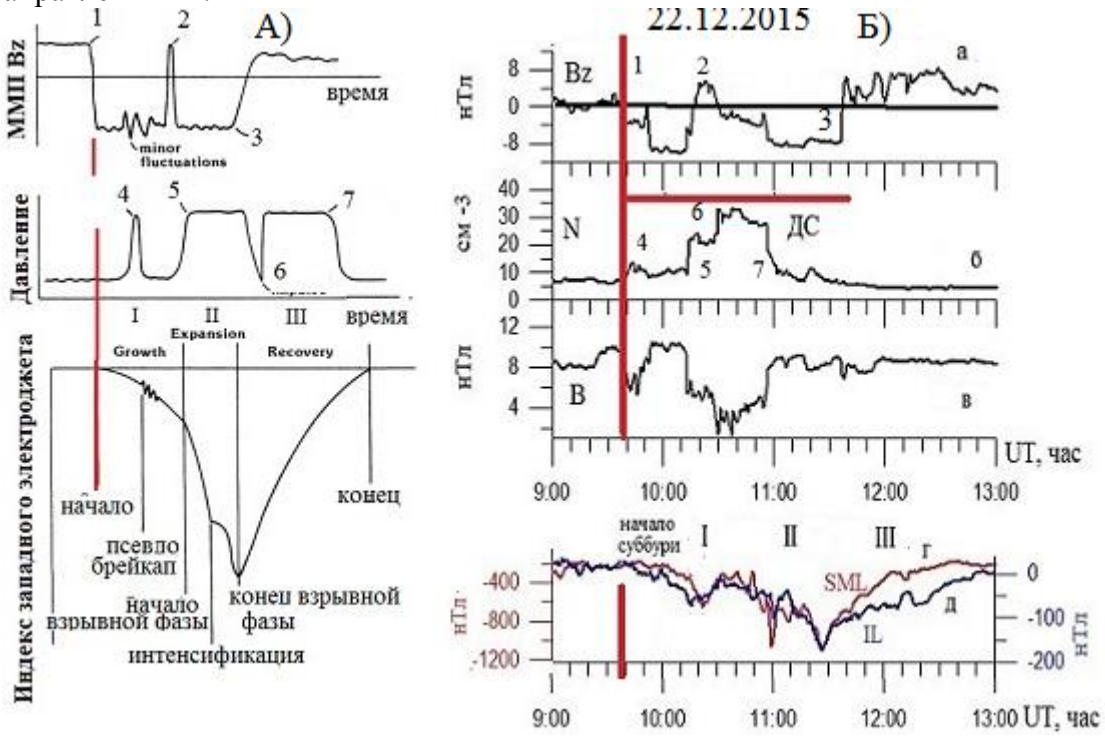
О соответствии динамики глобальной изолированной суббури статистической модели МакФеррона.

Пархомов В.А.[1], Еселевич В.Г.[2], Еселевич М.В.[2]

Байкальский государственный университет, pekines_41@mail.ru

Институт Солнечно-Земной Физики СО РАН, esel@iszf.irk.ru

Показано, что на орбиту Земли 22.12.2015г. прибывает диамагнитная структура (ДС) медленного солнечного ветра (СВ), источником которой на Солнце является цепочка стримеров. Взаимодействие этой ДС с магнитосферой Земли происходит в условиях, когда в предшествующем ему невозмущенном СВ продолжительное время сохранялась северная ориентации компоненты Bz межпланетного магнитного поля. В результате взаимодействия и резкой смены направления Bz на южное происходит генерация изолированной суббури, длительность которой определяется длительностью взаимодействия с ДС. Суббуря начинается в околополуденные часы прохождением ДС в магнитосферу и распространяется к востоку. В течение двух часов наблюдаются все фазы суббури – подготовительная, взрывная и восстановительная. Показано подобие вариаций параметров СВ и ММП для изолированной суббури, энергетическим источником которой была ДС медленного солнечного ветра, а триггером резкая смена направления вертикальной компоненты ММП с северного на южное, статистической модели МакФеррона тех же параметров СВ и ММП. Модель обобщает 40% случаев длительных наблюдений индивидуальных суббурь, триггером которых была смена направления Bz.



А) Статистическая модель связи между скачками *Bz* ММП, давления СВ и вариацией AL индекса магнитной активности в течение изолированной суббури. Цифрами обозначены характерные моменты вариаций. [McPherron R. L., Terasawa T., Nishida A J. Geomag. Solar Wind Triggering of Substorm Expansion Onset. *J. Geomag. Geoelectr*., 38, 1089-1108, 1986]
Б) Вариации тех же параметров для изолированной суббури 22.12.2015 г. Арабскими цифрами обозначены те же характерные моменты, что и для модели. Римскими цифрами обозначены фазы суббури.

ДИНАМИКА СИЯНИЙ И ВОЗНИКНОВЕНИЕ SAR-ДУГИ В СОБЫТИИ УСИЛЕНИЯ МАГНИТОСФЕРНОЙ КОНВЕКЦИИ. НАЗЕМНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Иевенко И.Б., Парников С.Г.

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

Принято считать, что стабильные авроральные красные (SAR) дуги наблюдаются во время фазы восстановления магнитных бурь, когда происходит перекрытие энергичных ионов кольцевого тока с плазмопаузой. В то же время, спутниковые и наземные наблюдения в ряде случаев указывали на перекрытие кольцевого тока с внешней плазмосферой и возникновение SAR дуги в начале главной фазы бурь.

Наши исследования субаврорального свечения на меридиане Якутска показали, что SAR дуги появляются и / или уярчаются в окрестности экваториальной границы диффузного сияния (ДС) во время расширения суббурь как результат быстрого проникновения энергичных ионов ассиметричного кольцевого тока в область внешней плазмосферы [1-3]. Новые данные наблюдений камерой всего неба (all-sky imager, ASI) “Keo Sentry” показали, что красные дуги иногда возникают уже на фазе роста суббури (усиления конвекции) [4].

В этой работе представлены результаты одновременных наблюдений ASI динамики сияний на авроральных станциях в Жиганске (CGMLat 62º, CGMLon 196º), Тикси (67º, 199º) и возникновения SAR-дуги на субавроральной ст. Маймага (58º, 202º) во время резкого усиления конвекции 15 марта 2018 г. Интенсификация магнитосферной конвекции при южном *Bz* ММП в течение ~3-х часов вызвала геомагнитные возмущения без признаков фазы расширения суббури с амплитудными значениями индексов *ASY* и *SYM-H* ~50 и -30 нТл, соответственно.

На авроральных станциях ASI наблюдали сначала уярчение и движение дискретных дуг к экватору с дальнейшим образованием области активных сияний в интервале геомагнитных широт 62-70º в после-полуночном секторе MLT. На ст. Маймага ASI начал регистрировать формирование SAR-дуги в эмиссии 630.0 нм в окрестности экваториальной границы ДС на геомагнитной широте ~60º через ~40 минут после начала усиления конвекции. Далее, красная дуга с интенсивностью 120-130 Релей отделилась от ДС и сместилась к экватору на ~3 градуса широты от его границы. В это время спутник DMSP *F15* измерил субавроральный пик электронной температуры (*Te*-пик) в *F*-области ионосферы на широтах SAR-дуги вблизи меридиана оптических наблюдений. Спутник VAP-A зарегистрировал резкую плазмопаузу на *L*-оболочке с геомагнитной широтой ~57.5º, которая соответствовала полярному краю красной дуги и *Te*-пика.

Таким образом результаты наземных и спутниковых наблюдений показывают, что в событии 15 марта 2018 г. SAR-дуга отображала динамику перекрытия внешней плазмосферы потоком энергичных ионов в ночном секторе MLT как следствие усиления магнитосферной конвекции при длительном южном *Bz* ММП.

Работа выполнена в рамках государственного задания № АААА-А21-121011990007-1 при частичной поддержке Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 21-55-50013.

1. Иевенко И.Б. // Геомагнетизм и аэрономия 1999. Т. 39. С. 26.
2. Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. // Геомагнетизм и аэрономия 2004. Т. 44. С. 643.
3. Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. // Adv. Space Res 2008. V. 41. P. 1252.
4. Иевенко И.Б., Парников С.Г. // Геомагнетизм и аэрономия 2022. Т. 62. (в печати).

СВИСТОВЫЕ ВОЛНЫ И ИХ РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЭЛЕКТРОНАМИ ВО ВРЕМЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНЫХ ДИПОЛИЗАЦИЙ

Малыхин А.Ю., Григоренко Е.Е., Шкляр Д.Р., Панов Е.В., Le Contel O., Avanov L., Giles B.

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

Данная работа посвящена исследованию процессов взаимодействия квазипараллельных свистовых волн, наблюдаемых во время продолжительных диполизаций, с электронной популяцией в диапазоне энергий от 0.6 до 30 кэВ, и определены питч-угловые и энергетические характеристики резонансных электронов. Данный диапазон энергии соответствует энергиям тепловой популяции электронов ПС во время таких активных процессов как диполизация. До запуска миссии MMS возможности исследования динамики функции распределения электронов, на временных масштабах волнового всплеска (~нескольких секунд) было невозможным из-за недостаточного временного разрешения плазменных спектрометров. Используя измерения трёхмерных функций распределения электронов по скоростям инструментом FPI спутниками MMS с высоким временным разрешением, была исследована динамика анизотропии функции распределения электронов и её связь с наблюдаемыми всплесками свистовых волн.

Наблюдения MMS позволили рассчитать инкремент (декремент) γ свистовых волн на масштабах времени волновых всплесков (~несколько секунд). Показано, что в большинстве событий из собранной базы данных резонансные электроны с энергиями $W_{res} \geq 10$кэВ и питч-углами $\alpha_{res} \sim 100^\circ - 130^\circ$ и $\alpha_{res} \sim 50^\circ - 80^\circ$ вносят максимальный положительный вклад в инкремент этих волн. Большие значения W_{res} были обусловлены низкими относительными частотами (f_w / f_{ce}) наблюдаемых свистовых волн $f_w \leq 0.2 f_{ce}$.

Большие значения W_{res} объясняют неожиданные значения температурной анизотропии $T_\perp/T_\parallel < 1.0$, наблюдаемые во время многих всплесков квазипараллельных свистовых волн из используемой базы данных. Из-за близости энергий резонансных электронов к верхнему порогу энергий FPI соответствующие значения $T_\perp/T_\parallel$ неправильно отображают реальную анизотропию электронной функции распределения по скоростям, ответственной за генерацию свистовых волн. Таким образом, можно предположить, что свистовые волны, наблюдаемые в периоды, когда $T_\perp/T_\parallel < 1.0$, возможно, также были генерированы за счёт локальной циклотронной неустойчивости, как и свистовые волны, наблюдаемые в периоды с $T_\perp/T_\parallel > 1.0$.

Выявлено, что во время продолжительных диполизаций свистовые волны играют важную роль в динамике функции распределения электронов по скоростям, наблюдаемой в диапазоне энергий более 2~кэВ. В этом диапазоне энергий резонансные электроны более низких энергий передают энергию волнам, которые, в свою очередь, передают свою энергию резонансным электронам более высоких энергий. Таким образом, будучи возбужденными циклотронной неустойчивостью, вызванной температурной анизотропией надтепловых электронов, свистовые волны играют важную роль в обмене энергией между различными частями энергетического спектра в надтепловом и сверхтепловом диапазонах энергий электронов. Это может привести к трансформации высокоэнергичной части функции распределения электронов от максвелловской к степенной форме.

Данные результаты получены в рамках фундаментальных исследований по теме "Плазма". Работа Малыхина А.Ю. и других соавторов - сотрудников ИКИ РАН из других источников не финансировалась.

Результаты опубликованы в статье: Malykhin, A. Y., Grigorenko, E. E., Shklyar, D. R., Panov, E. V., Le Contel, O., Avanov, L., & Giles, B. (2021). Characteristics of resonant electrons interacting with whistler waves in the nearest dipolarizing magnetotail. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, e2021JA029440. https://doi. org/10.1029/2021JA029440

СТРУКТУРИРОВАНИЕ ИОНОВ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ КИНЕТИЧЕСКОЙ БАЛЛОННО-ПЕРЕСТАНОВОЧНОЙ НЕУСТОЧИВОСТЬЮ

Панов Е.В.[1], Лу С.[2], Притчетт Ф.Л.[3]

[1]*Space Research Institute, Austrian Academy of Sciences (IWF/ÖAW), Graz, Austria,* evgeny.panov@oeaw.ac.at

[1] *CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, CAS Key Laboratory of Geospace Environment, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei, China*

[3] *Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, CA, USA*

Комбинируя наблюдения с трёх спутников THEMIS и трехмерное моделирование методом частиц в ячейках, мы идентифицируем ключевые структуры на масштабах ионного гирорадиуса, которые возникают в связи с ростом кинетической балонно-перестановочной неустойчивости (BICI) в хвосте магнитосферы Земли. Мезомасштабные структуры возникают в местах сильного сдвига скорости ионов и завихренности, где ларморовский радиус теплового иона составляет около половины ширины BICI-„головы“. Более тонкая ионная структура возникает на меньших масштабах, характеризующих длину волны электромагнитных ионно-циклотронных волн, генерируемых на BICI-„голове“. Эти два процесса приводят к эрозии и утоншению токового слоя, тем самым формируя локальную конфигурацию хвоста магнитосферы, благоприятную для магнитного пересоединения.

ПЛАНЕТАРНЫЕ ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ СУПЕРСУББУРЬ: АНАЛИЗ ОТДЕЛЬНЫХ СОБЫТИЙ

Дэспирак И.В.[1], **Клейменова Н.Г.**[2], **Любчич А.А.**[1], **Громова Л.И.**[3], **Сецко П.В.**[1], **Вернер Р.**[4]

[1] *ПГИ, г. Апатиты, Россия, despirak@gmail.com*
[2] *ИФЗ РАН, г. Москва, Россия*
[3] *ИЗМИРАН, г. Москва, Россия*
[4] *ИКИТ БАН, г. Стара Загора, Болгария*

Целью данной работы является исследование наземных магнитных эффектов очень интенсивных суббурь, так называемых «суперсуббурь» (supersubstorms - SSS) на основе данных глобальных сетей магнитометров (SuperMAG, IMAGE), а также магнитных регистраций на спутниках AMPERE. Анализируются несколько случаев наблюдения суперсуббурь (SML < -2000 нТл). Суперсуббури происходили на фоне развития интенсивных магнитных бурь, которые были вызваны воздействием на магнитосферу магнитных облаков (МС) с устойчивым южным направлением ММП. Были проанализированы карты векторов магнитного поля, полученных на сети SuperMAG и карты сферического гармонического анализа распределения магнитных векторов в ионосфере и продольных токов, полученных по данным низкоапогейных спутников связи Iridium системы AMPERE. Показано, что ионосферные токи развивались в глобальном масштабе. Во-первых, наблюдался очень интенсивный западный электроджет с сильными возмущениями в авроральных широтах (~ -2000 нТл) на ночной стороне и относительно небольшими бухтами в (~ -400 нТл) на дневной стороне в полярных широтах. Подобные дневные полярные возмущения, наблюдаемые одновременно с интенсивными суббуревыми возмущениями, могут быть результатом вытягивания тока западного направления на дневную сторону. Во-вторых, наблюдался очень интенсивный восточный электроджет в послеполуденно-вечернем секторе с максимумом ~18 MLT. Предполагается, что появление интенсивного восточного электроджета связано с формированием дополнительного частичного кольцевого тока и появлением дополнительного токового клина обратного направления. Кроме того, развитие суперсуббурь сопровождалось появлением больших положительных бухт на средних геомагнитных широтах, что отразилось в импульсах MPB-индекса.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 20-55-18003_Болг_а) и ННФБ (проект КП-06-Россия / 15).

ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ДИАПАЗОНА Pc5/Pi3 В ГЕОМАГНИТНОМ ХВОСТЕ И ФЛУКТУАЦИИ ММП И ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Ягова Н. В., Козырева О. В, Носикова Н. С.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, nyagova@yandex.ru

Вопрос о соотношении индуцированного ответа магнитосферы на внешние возмущения и активной генерации волновых и импульсных возмущений внутри магнитосферы относится к наиболее важным в магнитосферной физике. Область долей магнитосферного хвоста и их ионосферных проекций – полярных шапок, характеризуется не высокими (по сравнению с более активными областями полярного каспа и аврорального овала) амплитудами электромагнитных колебаний в диапазоне первых миллигерц. При этом из-за огромного объема магнитосферного хвоста, суммарная энергия этих колебаний не является малой. Наличие собственной активности в полярных шапках было исследовано на поверхности Земли и выявлено, что параметры колебаний не даже в среднем не могут быть предсказаны из параметров вне магнитосферы [1,2]. В работе [3] было показано, что специфические высокодобротные колебания в долях хвоста наблюдались при практически полном угасании флуктуаций того же частотного диапазона в межпланетной среде.

Настоящая работа посвящена статистическому исследованию параметров геомагнитных пульсаций диапазона первых мГц (Pc5/Pi3) в геомагнитном хвосте при разных уровнях флуктуаций межпланетного магнитного моля (ММП) и динамического давления солнечного ветра по данным измерения на спутниках Cluster в 2016 году. Особое внимание уделяется условиям «нулевой» возмущенности, когда амплитуды возмущений в межпланетной среде значительно меньше их средних значений.

Показано, что амплитуда колебаний в геомагнитном хвосте слабо зависит от амплитуды вне-магнитосферных флуктуаций. Как при возмущенных, так и при спокойных условиях наблюдаются колебания различных пространственных масштабов, при этом частота появления крупномасштабных колебаний, подобных обнаруженным в работе [3], возрастает при невозмущенных внешних условиях.

Таким образом, «нулевые» колебания, наблюдающиеся в доле хвоста, вероятно являются собственными колебаниями, их амплитуда составляет от долей нТл до первых нТл, а мощность приблизительно равно распределена между продольной и поперечными компонентами. Волновые формы развивающихся в этих условиях крупномасштабных колебаний идентичны, а набег фазы равен нулю на расстояниях порядка первых Re.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-05-00787.

1. Yagova N.V. et al. // Ann. Geophys. 2010. V. 28. P. 1761.
2. Ягова Н. В. // *Геомагн. и Аэр. 2015. Т. 55 № 1, С. 35.*
3. Nosikova et al. // Ann. Geophys. 2022. V. 40 (in press)

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВЫХ ПРОТОНОВ В ПЛОСКОСТИ МАГНИТНОГО ЭКВАТОРА ПЛАЗМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ ПРОЕКТА «ИНТЕРБОЛ»

Котова Г.А., Безруких В.В.

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

По измерениям холодной (< 1 эВ) плазмы во внутренней магнитосфере Земли широкоугольным анализатором, работавшем на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-1 и субспутнике МАГИОН-5 космического аппарата ИНТЕРБОЛ-2, определялись плотность и температура протонов, а также потенциал космического аппарата. Анализировались значения этих величин, зарегистрированные вблизи плоскости геомагнитного экватора. Распределения плотности и температуры протонов в зависимости от параметра МакИлвейна L (расстояние до Земли в радиусах Земли в экваториальной плоскости) различны в глубине плазмосферы и в пограничном слое плазмосферы. Температура протонов в плазмосфере существенно зависит от локального времени и определяется, в основном, температурой плазмы в нижележащей ионосфере. Потенциал космического аппарата зависит от того, находится ли спутник в области оптической тени Земли или вне ее, при входе в область тени потенциал аппарата резко падает. Количественные характеристики зависимостей параметров протонов от расстояния до Земли можно использовать для анализа различных физических процессов в околоземной плазме.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ (АКР) В ПРИЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ НА СПУТНИКЕ ERG

Чугунин Д.В., Могилевский М.М., Колпак В.И., Чернышов А.А.

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

Для анализа распространения АКР мы использовали результаты измерений ВЧ составляющей электрического поля в эксперименте PWE-HFA на спутнике ERG. В этом эксперименте, кроме традиционных измерений компонент электрического поля, вычисляется поляризация принимаемого излучения. Эти измерения позволяют определить положение источников излучения – в северном или в южном полушарии. Был проведен статистический анализ излучений в приэкваториальной области, который показал, что доминирующей составляющей является необыкновенная волна, что является определенным аргументом в дискуссии о модах АКР, достигающих магнитного экватора. Вместе с тем, достаточно часто мы наблюдали излучение из противоположного полушария: в южном полушарии - от северных источников и в северном - от южных. При этом явно выраженной трансформации спектра АКР на низких частотах (ниже 150-250 кГц) в противоположном полушарии не наблюдалось. Это противоречит ранее опубликованным теоретическим моделям и указывает на необходимость дальнейших исследований с привлечением одновременных измерений на двух (или более) спутниках.

Каналирование Аврорального Километрового Радиоизлучения при геомагнитных возмущениях

М.М. Могилевский, Д.В. Чугунин,
В.И. Колпак, А.А. Чернышов, Г.А. Котова,

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, mogilevsky2012@gmail.com

Во время геомагнитных возмущений происходит «поджатие» плазмопаузы и за ней остаются плазменные неоднородности, природа которых в настоящее время до конца не ясна. Эти неоднородности вытягиваются вдоль силовых линий магнитного поля и образуют плазменные каналы, в которые захватываются различные типы излучений. Мы использовали особенности распространения Аврорального Километрового Радиоизлучения (АКР) для исследования динамики этих неоднородностей. По результатам анализа измерений электрической компоненты поля, выполненных на спутнике ERG (ARASE), зарегистрирован захват АКР в плазменные каналы. Сравнение измерений на спутниках ERG и WIND показало, что при распространении АКР в плазменных каналах происходит изменение спектра АКР, позволяющее оценить свойства каналов. Приведен случай, когда в канале распространялись сигналы от двух источников расположенных в разных полушариях. Из анализа спектров этих сигналов следует, что каналы не симметричны - в рассматриваемом случае граница канала в северном полушарии отстоит от поверхности Земли дальше, чем в южном полушарии. Скорость изменения положения границы каналов, удовлетворительно соответствует модельным оценкам движения ионосферной плазмы в магнитосфере.

Параметры каппа-аппроксимации ионных функций распределения при возмущенных условиях в магнитосфере 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 части в бесстолкновительной магнитосферной плазме к каппа распределениям, а затем к максвелловским распределениям при увеличении каппа-параметра относится к нерешенным проблемам физики магнитосферы. Статистический анализ параметров каппа аппроксимаций позволяет выделить области магнитосферы с максимально большими значениями каппа параметра, в которых, скорее всего, происходит максимально быстрая релаксация каппа распределений к максвелловским распределениям. Ранее было восстановлено двумерное распределение параметров аппроксимации ионных функций распределения в экваториальной плоскости магнитосферы Земли для спокойных геомагнитных условий [1]. Каппа-параметр определялся при аппроксимации ионных дифференциальных спектров единой каппа-функцией. Использовались данные миссии THEMIS. На основе проведенного в работе [1] анализа удалось выделить серповидную область с максимальными величинами каппа параметра (k>10) на геоцентрическом расстоянии от ~8 до ~10 земных радиусов. В настоящей работе проведены исследования распределения каппа параметра в возмущенных условиях. Показано, что область максимально больших k может быть выделена и во время возмущенных условия, а ее границы во время возмущения смещаются в радиальном направлении.

1. Kirpichev I.P., et al. // J. Geophys. Res., 2021. V. **126**, e2021JA029409. doi:10.1029/2021JA029409

ПРОДОЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ АЛЬФВЕНОВСКОЙ АОЛНЫ В ДИПОЛЬНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ: ГИРОКИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Костарев Д.В., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю.

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

Предложен механизм генерации продольного электрического поля альфвеновской волной в дипольном магнитном поле с запертыми частицами в гирокинетическом подходе. Отличием от предыдущих работ является решение задачи в строгих кинетических рамках, без использования гибридных МГД-кинетических методов. При этом параллельное электрическое поле, генерируемое предлагаемым механизмом, значительно больше, чем возникающее в гибридных подходах, а так же за счет связи между альфвеновской и электростатической модами в однородной плазме. Наблюдаемые высыпания электронов в полярных областях, коррелирующие с альфвеновскими частотами, так же свидетельствуют о больших значениях продольного электрического поля, чем в предлагаемых ранее механизмах. В работе учитывается неоднородность магнитного поля и конечность давления плазмы, из-за чего альфвеновская мода оказывается сцепленной с компрессионной, что обеспечивает продольную составляющую магнитного поля альфвеновской волны. Кроме того, обе моды приобретают параллельное электрическое поле за счет связи с электростатической модой, что следует из условия квазинейтральности в кинетике. Параллельное электрическое поле описывается неоднородным интегральным уравнением Фредгольма второго рода, возникающим из-за усреднения движения электронов по баунс-периоду. Это уравнение решено численно, в результате чего найдена продольная структура параллельного электрического поля альфвеновской волны в дипольной модели магнитосферы.

РЕЗОНАНСНОЕ УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ПО НАЗЕМНЫМ МАГНИТНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Бадин В.И.

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

Спектральный анализ доплеровских радарных наблюдений авроральной электроструи позволяет выделять резонансное ультранизкочастотное (УНЧ) поглощение магнитогидродинамических волн в магнитосфере. Выделение резонансного УНЧ поглощения осуществляется методом наименьших квадратов. Этот метод в данном случае реализован в виде диаграммного анализа спектрограмм доплеровских радарных наблюдений при последовательном сжатии спектрального окна, в котором решается вариационная задача на минимум функционала метода наименьших квадратов. Такой подход позволил выделить высокочастотную и низкочастотную ветви резонансного УНЧ поглощения, которые условно соответствуют полуволновым и четвертьволновым резонансам магнитных силовых линий. Диаграммный анализ дает возможность изучать изменчивость, как минимальных резонансных частот, так и мощности резонансного поглощения в обеих ветвях. Однако применение данного метода ограничено событиями достаточно высокой активности авроральной электроструи, когда в ней присутствуют сильные неоднородности электронной концентрации, которые обеспечивают интенсивное рассеяние радиоволн назад и, соответственно, отношение сигнал/шум, достаточно высокое для успешного анализа сигнала. В спокойных геомагнитных условиях при низкой активности электроструи происходит значительная потеря спектральной информации, и реализовать данный метод анализа радарных наблюдений не удается. Следовательно, не удается реализовать и круглосуточный мониторинг резонансного УНЧ поглощения, ограничиваясь только анализом отдельных событий высокой активности авроральной электроструи, которую можно оценивать, например, по геомагнитному *AE* индексу.

С другой стороны, магнитные наблюдения посредством высокочувствительных наземных магнитометров не имеют таких ограничений и могли бы обеспечить полноценную спектральную информацию, как в возмущенных, так и в спокойных геомагнитных условиях. Однако в этом случае возникает трудность иного рода. В высоких геомагнитных широтах обычно наблюдается интенсивная магнитосферная конвекция, которая приводит к тому, что высокоширотная ионосфера вместе с текущими в ней электрическими токами движется относительно наземных магнитометров. Так, в вечернем секторе местного времени наземный магнитометр и авроральная ионосфера обычно движутся навстречу друг другу, и это движение может приводить к голубому доплеровскому смещению частоты принимаемого сигнала. Напротив, в утреннем секторе местного времени наземный магнитометр и авроральная ионосфера обычно движутся в одном и том же направлении. Это движение может приводить к красному доплеровскому смещению частоты принимаемого сигнала, однако такое смещение будет, скорее всего, сравнительно незначительным. Для успешного осуществления мониторинга резонансного УНЧ поглощения по магнитным наблюдениям необходимо оценить величину и значимость доплеровского смещения частоты магнитных данных относительно радарных. В этом и состоит основная цель данной работы.

Данная работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект 20-05-00050.

ПЕРВАЯ МАГНИТНАЯ БУРЯ НОВОГО ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: ГЕОМАГНИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЫ 20 АПРЕЛЯ 2020 Г.

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

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

Начало нового, 25 цикла солнечной активности, было зафиксировано в декабре 2019. Первой достаточно интенсивной магнитной бурей стала буря 20 апреля 2020 г. (Dst = -59 нТл), вызванная подходом к магнитосфере Земли медленного магнитного облака, последовавшего после долгого периода спокойного солнечного ветра и, соответственно, слабой геомагнитной активности ($Kp < 2$). Буря характеризовалась длительной (~ 6 ч) начальной фазой, в течение которой параметры межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра претерпевали резкие изменения.

На основе данных магнитометров скандинавской меридиональной цепочки IMAGE и сети Intermagnet, а также карт распределения векторов магнитного поля системы SuperMAG исследовалось развитие геомагнитных возмущений в начальную фазу бури. При анализе распределения векторов геомагнитного поля в высоких широтах впервые были обнаружены крупномасштабные вихревые структуры, которые различались в разных долготных секторах, что в значительной степени обуславливались появлением отрицательной *By*-компоненты ММП: (1) при *By* ММП < 0 и *Bz* ММП < 0 вихрь, вращающийся по часовой стрелке, наблюдался в утреннем секторе высоких широт и сопровождался более слабым вихрем противоположного направления в вечернем секторе; (2) при *By* ММП < 0, на фоне *Bz* ММП, преимущественно положительном и слабо варьирующимся около нуля, оба вихря были значительно слабее и располагались в полярных широтах; (3) в условиях возросшего динамического давления и слабо варьирующегося около 0 и преимущественно отрицательного *By* ММП, при *Bz* ММП, резко меняющегося от слабо положительных до небольших отрицательных величин, утренний вихрь, вращающийся по часовой стрелке, усилился и сдвинулся к ночному сектору, а в дневном секторе высоких широт, появился более слабый вихрь, вращающийся против часовой стрелки. В этих условиях оба вихря, ранне-утренний и дневной, расширились до авроральных широт, и в дополнение к дневным вихревым структурам в ночном секторе авроральных широт начал формироваться западный электроджет.

Обнаруженные крупномасштабные вихревые структуры геомагнитного поля могут быть интерпретированы как результат локальной интенсификации продольных электрических токов, контролируемых *By* ММП. Таким образом впервые обнаружено формирование в начальную фазу магнитной бури крупномасштабных вихревых структур в дневном секторе высоких широт. Сделан вывод, что вариации ММП и усиление динамического давления солнечного ветра в начальную фазу бури могут вызывать усиление продольных токов, что проявляется как развитие вихревых структур и появление бухтообразных магнитных возмущений в утрене-дневном секторе высоких широт.

Взаимосвязь параметров магнитосферы с геомагнитными порогами космических лучей в зависимости от широты

Данилова О. А., Птицына Н.Г., Тясто М.И.

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

Магнитная жесткость R (момент на единицу заряда) характеризует способность космических лучей КЛ проникать внутрь магнитосферы извне. Геомагнитный порог или жесткость геомагнитного обрезания — это жесткость, ниже которой поток частиц обрезан из–за магнитного экранирования Земли. В результате магнитного обрезания возникает широтный эффект.

Динамическое взаимодействия магнитных и электрических полей солнечного ветра (СВ) с магнитосферными полями и токами приводит к изменению порогов (ΔR), особенно сильному во время магнитных бурь.

Знание широтных зависимостей ΔR от параметров СВ и магнитосферы может прояснить некоторые черты взаимодействия системы СВ — магнитосфера и сопутствующие геомагнитные эффекты, которые управляют транспортировкой КЛ через магнитосферу и атмосферу во время возмущений [1]. Кроме теоретического значения, это важно для обеспечения безопасности экипажа и пассажиров космических полетов, а также высокоширотной и высотной авиации. Учет последствий плохой космической погоды становится еще более актуальным в свете современной тенденции развивать орбитальные скоростные межконтинентальные перелеты между любыми точками на Земле.

Цель: Проследить динамику изменений геомагнитных порогов ΔR в зависимости от динамики параметров межпланетной среды и геомагнитосферы во время эволюции супербури 7–8 сентября 2017 г. на разных этапах развития бури — перед началом бури, в ее главной и восстановительной фазах. Фокус работы — на широтных эффектах.

Методы: R рассчитаны 2 способами: (1) $R_{эф}$, методом прослеживания траекторий частиц космических лучей в модельном магнитном поле магнитосферы TS01 [2] и (2) $R_{cгс}$ методом [3] спектрографической глобальной съемки на основе наблюдательных данных мировой сети нейтронных мониторов.

ΔR определялись как разности между значениями жесткостей, рассчитанными для каждого часа в период бури, и жесткостями в спокойный период перед бурей 6 сентября 2017г. ΔR вычислялись для станций КЛ, которые в спокойное время охватывают большую полосу жесткостей обрезания от 11 до 2 ГВ: ESOI, Алматы, Рим, Иркутск, Москва и Кингстон.

Рассчитаны корреляции вариаций жесткостей геомагнитного обрезания с *Dst*- и Кр-индексами геомагнитной активности, параметрами солнечного ветра и межпланетного магнитного поля (ММП) во время трех фаз магнитной бури.

Изменение геомагнитных порогов ΔR (как $\Delta R_{cгс}$ так и $\Delta R_{эф}$) во время бури 7–8сентября 2017 г. наиболее сильно коррелирует с *Dst*-индексом, что свидетельствует о том, что кольцевой ток играет главную роль в контроле вариаций жесткостей обрезания КЛ. Также виден значительный контроль $\Delta R_{cгс}$ и $\Delta R_{эф}$ со стороны V. Корреляция с магнитными параметрами существенна только для модельных значений $\Delta R_{эф}$, но не для $\Delta R_{cгс}$.

Чувствительность ΔR к динамическим и магнитным параметрам межпланетной среды различна на разных фазах бури и отличается от чувствительности, посчитанной на масштабе всей бури. На главной фазе существенно как влияние ММП, так и динамических параметров СВ, а на восстановительной фазе преобладает влияние динамических параметров СВ, а именно, давления P и плотности N.

1. Птицына Н.Г., Данилова О.А., Тясто М.И., Сдобнов В.Е. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 61. № 2, с. 160–171. 2021.
2. Tsyganenko N.A. // J.Geophys. Res. V. 107. No. A8. P.1176. 2002.
3. Dvornikov, V.E. and Sdobnov, V.E. //Int. J. Geomagn. Aeron., 2002, V. 3, pp. 217–223.

ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СФЕРИЧЕСКИ РАСШИРЯЮЩЕГОСЯ ОБЛАКА ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ КИ-1

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

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, efim.sci@gmail.com

В данной работе представлен лабораторный эксперимент по моделированию сферически симметричного расширяющегося плазменного облака [3] и его взаимодействие с внешним магнитным полем [2]. Для целей лабораторного моделирования выбросов плазмы в околоземной среде впервые применено 4-х лучевое облучение сферической мишени по схеме тетраэдра. Регистрация параметров лазерной плазмы осуществлялась сверх-скоростным фотографированием, электрическими зондами Ленгмюра и коллекторами, а также спектральной диагностикой. Сферичность облака подтверждена фотографиями и зондовыми измерениями.

Представленные данные демонстрируют быстрое схлопывание магнитной каверны и образование желобковой неустойчивости на границе формируемого плазменного облака. На относительно далеких расстояниях от мишени наблюдалось формирование двух струй, распространяющихся вдоль магнитного поля в диаметрально противоположных направлениях. Сопоставление сигналов по времени показывает, что струи вдоль поля образуются в процессе обратного движения облака в экваториальной плоскости.

Настоящая работа была выполнена в рамках программы №5-5 НЦФМ (ВНИИЭФ) при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117021750017-0) и проекта РФФИ № 18-2921018.

1. Shaikhislamov I. F. et al. // Plasma Physics Reports. – 2015. – V. **41.** – №. 5. – P. 399-407*2*.
2. Авдыева А.А., Захаров Ю.П., Максимов В.В., и др. //Прикладная механика и техническая физика. – 1989. – Т. **30.** – №. 6. – С. 62-66.
3. Howard J.E. et al. //Applied optics. – 1977. – V. **16.** – №. 10. – P. 2764-2773.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УСКОРЕНИЯ И ПЕРЕНОСА ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ МАГНИТОПЛАЗМЕННЫХ СИСТЕМАХ

Жукова Е.И.

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

Работа посвящена исследованию причин ускорения и переноса плазмы солнечного ветра в Земной магнитосфере. Построена численная модель, учитывающая различные сценарии ускорения плазмы [1-4] в токовом слое магнитосферного хвоста Земли. Модель позволяет оценивать эффективность ускорения заряженных частиц (электронов, ионов водорода, гелия и кислорода) в процессах : (A) диполизации; (B) прохождения в среде с турбулентностью; (C) прохождения множественных диполяризационных фронтов; (D) комбинированных механизмов: (A) и (C) с добавлением (D) плазменной турбулентности. Показано, что на разных временных масштабах сценарии (A) - (D) способствуют различному ускорению популяций частиц. Чем ближе масштаб изменения поля к гирориуду ионов, тем эффективней перенос энергий от полей к частицам. Показано, что ионы O^+ эффективно ускоряются за счет механизма (A); ионы H^+ и He^+ (и в некоторой степени e^-) более эффективно ускоряются в процессе (C), чем в (B). Установлено, что e^- могут быть значительно ускорены в процессе (D). Результаты моделирования показали, что вышеперечисленные процессы носят резонансный характер [4]. Обсуждаются формы энергетических спектров.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-02-00957 и 17-02-01328, РНФ № 14-12-00824.

1. Жукова Е.И., Малова Х.В., Попов В.Ю., Григоренко Е.Е., Петрукович А.А., Зеленый Л.М. // Космические исследования 2017. Т. **55**. С. 429.

2. Zhukova E.I., Malova H.V., Grigorenko E.E., Popov V.Yu., Petrukovich A.A., Delcourt D. C., Kronberg E.A., Daly P.W., Zelenyi L.M. // Ann. Geophysics 2018. V. **61**. P. 1.

3. Parkhomenko E.I., Malova H.V., Popov V.Yu., Grigorenko E.E., Petrukovich A.A., Kronberg E.A., Zelenyi L.M. // Cosmic Res. 2018. V. **56**. P. 465.

4. Parkhomenko E.I., Malova H.V., Grigorenko E.E., Popov V.Yu., Petrukovich A.A., Delcourt D. C., Kronberg E. A., Daly P. W., Zelenyi L.M. // Phys. Plasmas 2018. V. **26**. P. 42901.

ДИНАМИКА НОЧНЫХ ГРАНИЦ АВРОРАЛЬНОГО ОВАЛА ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ 27–29 МАЯ 2017 ГОДА

Иванова А. Р., Калегаев В.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, ivanova.ar20@physics.msu.ru

По данным низкоорбитального спутника Метеор М2 исследована динамика границ аврорального овала на ночной стороне в период магнитной бури, наблюдавшейся с 27 по 29 мая 2017 года. Исследовалась зависимость положения границ во время различных фаз бури от состояния магнитосферы и межпланетной среды. Экспериментально полученные данные сопоставлялись с данными, рассчитанными по модели, основанной на зависимости положения овала от AL-индекса. Получено, что во время фазы начала бури главным фактором был резкий импульс давления солнечного ветра, который в сочетании с устойчивым южным межпланетным магнитном полем привел к сжатию магнитосферы и расширению овала. В период главной фазы и фазы восстановления бури динамика границ овала лучше всего коррелирует с вариацией Bz-компоненты межпланетного магнитного поля – при увеличении Bz-компоненты овал поднимается по широте. Показано, что полярная граница непосредственно реагирует на изменения в межпланетной среде, а экваториальная граница в большей степени зависит от состояния магнитосферы и уровня геомагнитной активности.

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ МЕЖПЛАНЕТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ (ММП) НА РАЗВИТИЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Клайн Б.И., Зотов О.Д., Куражковская Н.А.

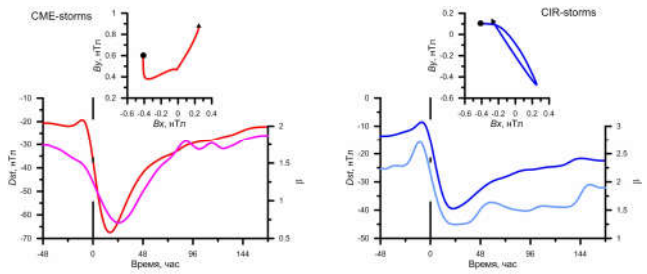
Геофизическая обсерватория "Борок" ИФЗ РАН, п. Борок, Россия, klain@borok.yar.ru

В данной работе выполнено статистическое исследование конфигурации ММП в потоке солнечного ветра в период, предшествующий возникновению магнитных бурь, триггером которых были CME (Coronal Mass Ejection) и CIR (Corotating Interaction Regions). Анализировались 118 событий CME и 91 события CIR, зарегистрированных в околоземном пространстве за период с 1995 по 2004 г.г. и идентифицированных в работе [Turner et al., 2009]. Информация о параметрах солнечного ветра, ММП и Dst индексе получена из базы данных OMNI (https://spdf.gsfc.nasa.gov/pub/data/omni/low_res_omni/). Для определения конфигурации ММП были построены среднестатистические годографы по усредненным часовым данным *Bx*- и By- компонент ММП в течение 48 часов до начала геомагнитных бурь, вызванных CME и CIR. Кроме того, методом наложения эпох проанализирована динамика Dst индекса и β параметра солнечного ветра (β - отношение плазменного давления к магнитному) для этих же случаев наблюдения CME и CIR.

Показано, что как в потоке CME, так и CIR наблюдаются замкнутые образования, конфигурация которых аналогична структуре ММП в магнитных облаках [Klein and Burlaga, 1982]. Причем среднестатистические годографы вектора *B* ММП для CME и CIR имеют различное направление вращения. Для годографов CME и CIR характерно левое вращение (против часовой стрелки) и правое вращение (по часовой стрелке) вектора *B* ММП, соответственно, в плоскости эклиптики.

Обнаружено, что качественное поведение Dst индекса и β параметра во время развития бурь, вызванных CME и CIR, подобно динамике этих параметров для бурь с внезапным и постепенным началом [Куражковская и др., 2021]. В главную фазу бурь, вызванных CME и CIR, в минимуме Dst индекса величина параметра β достигает значений ~ 0.75 и 1.25, соответственно, что отражает различный уровень турбулентности плазмы в этих потоках солнечного ветра.

На рисунке показаны среднестатистические проекции годографов вектора *B* ММП на плоскость XY солнечно-эклиптической системы координат за 48 часов до начала бурь, обусловленных CME и CIR. Кружки и треугольники – начало и конец годографов, соответственно. В нижней части рисунков даны вариации Dst индекса (красная и синяя кривые) и β параметра (розовая и голубая кривые) солнечного ветра, полученные методом наложения эпох для CME и CIR событий на интервале 48 часов до начала и 168 часов после начала бурь. За реперную точку выбирался момент начала бурь из [Turner et al., 2009].



Предполагается, что среди факторов, определяющих различную геоэффективность CME и CIR, в том числе, могут быть направление вращения вектора *B* ММП в плоскости эклиптики и турбулентность плазмы солнечного ветра, характеризуемая величиной параметра β.

Работа выполнена в рамках Государственного задания Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН.

ВОЗДЕЙСТВИЕ СУББУРЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА УЛЬТРАНИЗКОЧАСТОТНОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ТИПА “СЕРПЕНТИННОЙ ЭМИССИИ” В ПОЛЯРНОЙ ШАПКЕ

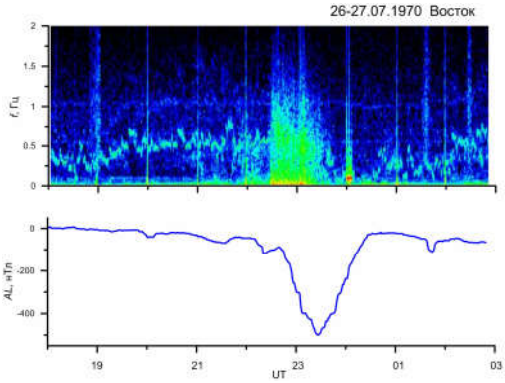
Клайн Б.И., Куражковская Н.А.

Геофизическая обсерватория "Борок" ИФЗ РАН, п. Борок, Россия, klain@borok.yar.ru

Приведены результаты исследования одновременных наблюдений ультранизкочастотных (УНЧ) колебаний в диапазоне частот 0.1-5 Гц типа “серпентинной эмиссии” (serpentine emission - SE), наблюдаемой в области полярной шапки, и возмущений в ночном секторе авроральной зоны. Для анализа использованы уникальные аналоговые магнитные записи Антарктической обсерватории Восток (исправленные геомагнитные координаты Φ′=-85.41°, Λ′=69.01°), оцифрованные с высокой частотой (20 Гц) и находящиеся в свободном доступе на сайте Мирового Центра Данных по Солнечно-Земной Физике, Москва [http://www.wdcb.ru/arctic_antarctic/antarctic_magn_4.ru.html]. В нашем распоряжении имелись данные наблюдений УНЧ–колебаний за 1966 (ноябрь, декабрь), 1968 (март–июль), 1970–1972, 1973 (январь–март) г.г. Также использовалось графическое представление *AL* индекса с 2.5 мин разрешением за этот же период (архив Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН).

Предварительно по цифровым данным регистрации магнитного поля выполнялся спектрально-временной анализ УНЧ–колебаний. Затем проводилось визуальное сопоставление полученных динамических спектров SE с вариацией *AL* индекса. Индекс *AL*, как известно, отражает интенсивность западного электроджета в полуночном и раннем утреннем секторах аврорального овала во время развития суббурь в хвосте магнитосферы.

Одновременное сопоставление интервалов наблюдений SE с динамикой *AL* индекса показало, что во время развития интенсивных суббурь в ночном секторе авроральной зоны в области полярной шапки возникает широкополосное шумовое излучение, нарушающее режим генерации серпентинной эмиссии. На рисунке представлен типичный пример нарушения режима генерации серпентинной эмиссии на Востоке во время развития суббури 26–27.07.1970 г. Вверху – динамический спектр SE, внизу – динамика *AL* индекса, отражающая интенсификацию суббуревой активности в ночном секторе аврорального овала.



Эффект прерывания SE наблюдается практически в каждую суббурю с минимальной величиной *AL* индекса ниже –200 нТл. Момент прерывания SE по времени совпадает с началом широкополосного шумового электромагнитного излучения, интенсивность которого, видимо, существенно выше, чем интенсивность SE. Выдвинуто предположение о том, что во время развития суббурь возникающая инжекция протонов из хвоста магнитосферы в полярную шапку стимулирует возбуждение широкополосного шумового излучения, нарушающего режим генерации SE.

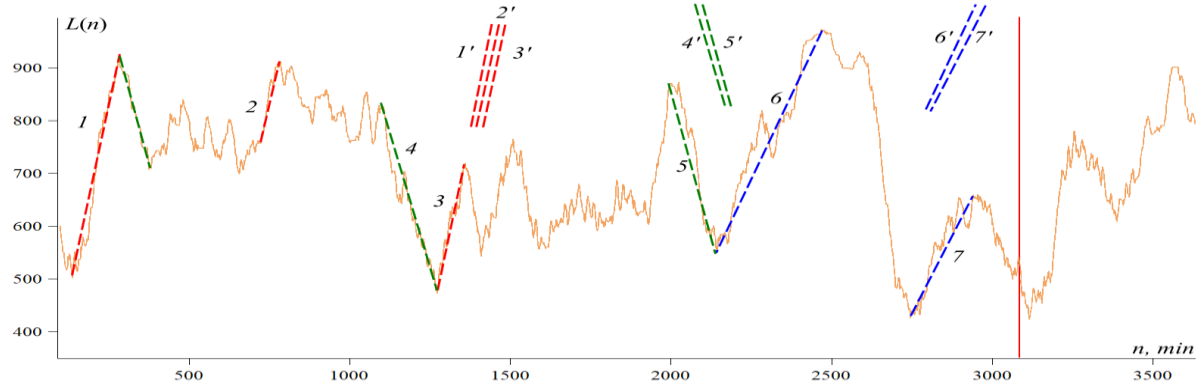
Работа выполнена в рамках Государственного задания Геофизической обсерватории “Борок” ИФЗ РАН.

О ПОВТОРЯЮЩИХСЯ ЯВЛЕНИЯХ В СТАТИСТИКЕ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНАХ

Коган Л.П., Вольвач А.Е., Канониди К.Х., Надежка Л.И., Бубукин И.Т., Штенберг В.Б.

ННГАСУ, г. Нижний Новгород, Россия, L_kog@list.ru

Одной из важнейших проблем, стоящих перед человечеством, следует считать поиск путей прогнозирования и предупреждения разномасштабных геофизических и связанных с ними техногенных катастроф. Созданный в Крыму геодинамический полигон «Симеиз-Кацивели» составил основу наземных и космических временных рядов исследования климатических и геофизических характеристик полуострова, особенно его Горной части. Индикатором экстремальных событий могут служить локальные изменения не только параметров атмосферы, но и вариации локального геомагнитного поля. В работе рассматриваются повторяющиеся во времени свойства статистического функционала [1] (см. также [2–3]), отвечающего статистике измерений магнитного поля, на примере сейсмического события магнитудой 7.3, произошедшего в регионе Индонезии 14.12.2021 в 03:20:24 UTC. Поведение указанного функционала как функции времени определяются мелкомасштабными отклонениями эмпирической плотности вероятности исследуемого сигнала от «идеального» распределения, которое соответствовало бы неограниченному числу отсчетов. На рисунке приведена зависимость функционала $L(n)$ с параметрами h=0,1, A=1000, M=100 [1]. Здесь аргумент n, $M \le n \le 3629$, – время в минутах; n=0 соответствует 00:00 12.12.2021. Рисунок отвечает данным магнитометра Charters Towers (CTA) с 00:00 12.12.2021 по 12:32 14.12.2021. Момент указанного землетрясения обозначен сплошной вертикальной красной прямой линией.



На рисунке пунктирные линии одного цвета соответствуют квазипараллельным отрезкам, которые соединяют точки начала и окончания соответствующих линейных трендов [1]. Углы между подобными отрезками не превосходят 2º, что иллюстрируется отрезками *1′* – *7′*, которые строго параллельны «своим» линиям *1* – *7*. Этот факт позволяет выдвинуть гипотезу о почти полном повторении скоростей протекания физических процессов на отвечающих этим отрезкам интервалах времени. Поскольку ни магнитные бури, ни ионосферные явления не обладают свойством подобной «записи» параметров рассматриваемых феноменов, то наиболее реальным кандидатом на роль таких процессов являются сейсмические процессы. В подтверждение данного тезиса отметим, что подобные эффекты с высокой вероятностью предшествуют землетрясениям в самых разных регионах мира.

1. A.E. Volvach, L.P. Kogan, K.H. Kanonidi, et al. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 2022. **V. 108.** 106200. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.106200
2. Kogan L.P., Bubukin I.T., Shtenberg V.B. Chaos, Solitons and Fractals 2021. **V. 145.** April 2021. 110807.
3. Коган Л.П. Геомагнетизм и аэрономия 2015. **Т. 55.** № 4. С. 525.

УСЛОВИЯ ПЕРЕНОСА АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ МАГНИТОСФЕРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

В.И. Колпак, М.М. Могилевский, Д.В. Чугунин, А.А. Чернышов, Г.А. Котова.

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, lera.kolpak@yandex.ru

По результатам анализа измерений электрической компоненты поля в диапазоне частот 10 кГц – 1 МГЦ, выполненных на спутнике ERG (ARASE), получены условия, при которых может происходить захват Аврорального Километрового Радиоизлучения (АКР) в плазменные неоднородности, вытянутые вдоль магнитного поля, и перенос этого излучения в приэкваториальную область и в противоположное полушарие. Из проведенного анализа следует, что захват АКР может происходить в плазменные каналы только с пониженной плотностью, а угол входа в канал должен быть не более 10-15 градусов. Ограничения по углу входа в канал связаны с тем, что при больших углах будет многократное отражение, что приведет к существенному подавлению сигнала. За время измерений (~ 2 часов) наблюдалось существенное смещение границы канала вверх. Это смещение может быть связано с постепенным замыванием каналов потоками восходящей ионосферной плазмы.

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И МАГНИТОПАУЗЫ ПО ДАННЫМ МАГНИТОМЕТРА КА MESSENGER

Невский Д.В., Лаврухин А.С., Парунакян Д.А.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, nevskii.dv17@physics.msu.ru

Целью данной работы является автоматическая обработка массива данных, собранного с помощью КА MESSENGER, для поиска положения головной ударной волны и магнитопаузы у магнитосферы Меркурия.

Поиск точек экстремума происходит с помощью метода RobustStatDetector, входящего в состав библиотеки Kats для анализа временных рядов. Данный модуль сглаживает временной ряд с помощью скользящего среднего, рассчитывает разности сглаженного временного ряда по параметрически заданному количеству точек, вычисляет стандартизированную оценку и p-значения для ранее рассчитанных разностей. Результатом работы метода является набор точек, в которых p-значение меньше параметрически установленного порога. Выбор данного алгоритма детектирования обусловлен в том числе его способностью обнаруживать несколько точек экстремума за один прогон по массиву данных. Для дальнейшего улучшения результатов поиска и исключения ошибочных точек мы задействуем алгоритм Window-based change point detector, входящий в состав библиотеки Ruptures, разработанной для анализа и сегментации нестационарных сигналов.

В ходе дальнейшей работы планируется разработать метод определения пересечений магнитопаузы с учетом изменения знака компонент магнитного поля. Наиболее перспективным подходом на данный момент является применение метода поиска с помощью бинарной сегментации на временном ряде модуля второй производной σ.

Работа выполнена в рамках проекта № 21-52-12025 Российского Фонда Фундаментальных Исследований.

K-ИНДЕКС: ИСТОРИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ СОВЕТСКИХ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ 1957-1992 гг.

Сергеева Н.А., Забаринская Л.П., Нисилевич М.В., Крылова Т.А., Хафизов А.С.

ГЦ РАН, г. Москва, Россия, n.sergeyeva@gcras.ru

Обеспечение сохранности исторических научных данных и организация свободного доступа к ним является основной миссией Мирового центра данных по солнечно-земной физике ГЦ РАН. Начало формирования архива Центра связано с выполнением наблюдательной программы Международного геофизического года (1957–1958), в которой участвовало более 30 советских геомагнитных обсерваторий. В МЦД по СЗФ сохраняются копии магнитограмм, среднечасовые и минутные значения элементов геомагнитного поля, определения индексов геомагнитной активности, данные о магнитных бурях и другие. В том числе сформирована уникальная база данных с результатами определения геомагнитного индекса *K* на 41 обсерватории бывшего СССР за период с июля 1957 года по начало 1990-х годов.

Индекс *K*, предложенный Ю.Бартельсом в 1938 г. и введенный в практику магнитных обсерваторий в 1939 г., является численной характеристикой локальной изменчивости геомагнитной активности на трехчасовых последовательных интервалах. Определение индекса *K* является стандартной процедурой магнитных обсерваторий, исходными данными для вычисления индекса являются магнитограммы. В отечественных обсерваториях данные готовились массивами за месяц в виде стандартных таблиц на бумаге, которые пересылались по почте в МЦД по СЗФ. Эти бумажные таблицы и сегодня занимают достойное место в архиве Центра.

С целью гарантированного сохранения этих данных и организации постоянного on-line доступа к ним весь массив бумажных документов был переведен в электронную форму путем сканирования и создания документов в формате PDF. Готовый структурированный массив электронных документов опубликован на сайте Центра [www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_K_C_ind.ru.html]. Затем весь массив данных был переведен в текстовые файлы в кодах ASCII. Бóльшая часть данных, представляющая рукописные документы, переводилась вручную, меньшая часть – с помощью программ распознавания форматированного текста и извлечения структурированных данных. Все текстовые файлы приведены к единому формату и также опубликованы на сайте.

На следующем этапе массив исторических данных о *K*-индексе 41 обсерватории бывшего СССР за 1957–1992 гг. был передан в базу данных PANGAEA – издателя данных по наукам о Земле и окружающей среде, и опубликован с присвоением идентификатора DOI [1]. Одновременно эти данные были введены в on-line базу данных «Геомагнетизм» [http://stp.wdcb.ru/index.php] и дополнены данными, продолжающими поступать в МЦД по СЗФ из ряда обсерваторий.

Представляемая база данных о *K*-индексе уникальна и представительна, включает данные, полученные на большой территории, охватывающей высокие, средние и низкие широты, состоит из длинных рядов непрерывных наблюдений. Индекс *K* является широко употребительным. Значения *K*-индекса, определенные в разных обсерваториях, используются для вычисления других индексов магнитной активности, индекс *K* используется для установления и изучения магнитных бурь, может быть использован для ретроспективного анализа солнечно-земного взаимодействия на протяжении почти восьми солнечных циклов.

1. Sergeyeva N., Gvishiani A., Soloviev A., Zabarinskaya L., Krylova T., Nisilevich M., Krasnoperov R. // PANGAEA. 2020. DOI: 10.1594/PANGAEA.922233.

ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ ЭЛЕКТРОНОВ В БЛИЗКОЙ (2-3) R_E МАГНИТОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА СПУТНИКА *ИНТЕРБОЛ-2*

Н.Ф. Смирнова[1], Г. Станев[2]

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

[2]*ИКИТ БАН, г. София, Болгария, gstanev@space.bas.bg*

Потенциал космического аппарата перестал считаться техническим параметром, так как в настоящее время широко применяется метод определения плотности окружающей плазмы в магнитосфере на основе его измерения датчиками электрических полей. Если потенциал спутника положительный относительно потенциала плазмы, то в этом случае баланс токов осуществляется только между электронным током и фототоком. Плотность фотоэлектронного тока используется при оценивании плотности электронов. Эта методика широко применяется для спутников типа *ISEE-1*, которые функционируют с потенциалом порядка 20 В. Нам удалось применить аналогичный подход для оценки плотности плазмы при низких значениях потенциала спутника, в основном 2-5 В. Таким спутником является *ИНТЕРБОЛ-2*. А. Педерсон предложил эмпирическую модель между плотностью фототока (Jph, $\mu A\text{-}m^{-2}$) и величиной потенциала спутника (Vs,B; Vs>0) [1]. Эту модель можно записать в виде:

$$Jph\ (V)= Jph0[\exp(-Vs/2)+0.0375\exp(-Vs/7.5)],$$

где Jph0 - плотность фототока насыщения. В работе [1] $Jph0=80\ \mu A\text{-}m^{-2}$.

В этой и подобных моделях плотность фототока насыщения имеет конкретное значение, поэтому проводятся калибровки концентрации электронов с учетом измерений другими приборами. Аппаратура спутника *ИНТЕРБОЛ-2* позволяет определить плотность фототока насыщения Jph0 на основе сопоставления одновременных измерений электрического потенциала спутника относительно плазмы зондовыми приборами ИЭСП-2 и КМ-7 [2]. Отметим, что фототок показывает большие вариации в зависимости от материала поверхности зондов и окружающей плазмы, а также со временем пребывания аппарата в магнитосфере. На спутнике *ИНТЕРБОЛ-2* в авроральной зоне магнитосферы на высотах (2–3)R_E плотность фототока насыщения находится, как правило, в диапазоне 18–36 μAm^{-2}. Для определения концентрации электронов на основе измерений потенциала *ИНТЕРБОЛ-2* применяется простая модель:

$Jph\ (V)= Jph0\exp(-Vs/2.1)$, где Jph0 определяется корректно по данным ИЭСП-2 и КМ-7.

Эта методика применяется только для положительного потенциала спутника *ИНТЕРБОЛ-2:* на высотах более 8000 км положительные значения составляли ~75 % , из них ~80% значений в диапазоне 2-5 В. Измерения потенциала проводятся прибором ИЭСП-2 с частотой опроса 400 мс при помощи телеметрии СТО на ~350 участках орбит. Потенциал спутника (корпуса) Vs определялся как среднее значение измерений разности потенциалов Ey1 и Ey2 между спутником и сферическими зондами Y1 и Y2 на концах штанги Y в плоскости вращения спутника. Для определения концентрации электронов используются только измерения, для которых выполняется abs(Ey1 - Ey2) < 0,5 В. т.е. составляющая электрического поля Ey<20 $мВм^{-1}$ (длина штанги 25 м). Если Vs< 6 В, то этом случае для ~80% измерений выполняется условие abs(Ey1 - Ey2) < 0,5 В.

По нашим оценкам концентрация электронов находится в основном в пределах 1-30 $см^{-3}$. В работе приводятся примеры с высокой и низкой плотностью электронов.

1. Pedersen A., Solar wind and magnetosphere plasma diagnostics by spacecraft electrostatic potential measurements //*Ann. Geophys.*, V.13, pp.118–121, 1995.
2. Smirnova N.F. and G. Stanev // Geom. Aeron., 2009, V.49, pp. 1204-1207.

НОВАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ПОТОКИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ ВДОЛЬ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

Смолин С.В.

Сибирский Федеральный Университет, г. Красноярск, Россия, smolinsv@inbox.ru

Предлагается новая основанная на физике математическая модель (обыкновенное дифференциальное уравнение), описывающая аналитически (когда Kp = const или Kp ≈ const) и численно (если Kp ≠ const) перпендикулярные (для питч-угла 90 градусов) дифференциальные или интегральные потоки релятивистских электронов на геостационарной (геосинхронной) орбите (ГСО), а также на любой круговой орбите в магнитосфере Земли в зависимости от местного времени (local time) LT на орбите, индекса геомагнитной активности Kp, параметра МакИлвейна L и перпендикулярного дифференциального потока или интегрального потока релятивистских электронов, взятых для LT = 0 ч. Используются наблюдения потоков релятивистских (> 2 МэВ) электронов, усредненные по местному часу LT вдоль ГСО с 1995 г. по 2009 г., собранные КА «GOES» [1]. Сделано сравнение модельного перпендикулярного (для питч-угла 90 градусов) интегрального потока релятивистских электронов с энергией больше 2 МэВ на ГСО, когда Kp ≈ const, например в течение одних суток, с усредненными экспериментальными данными КА «GOES». Получено практически идеальное согласие. Для всего диапазона от 00 LT до 24 LT вдоль ГСО величина эффективности предсказания (prediction efficiency [1]) точности предложенной математической модели получена PE = 0.9981. Если используются экспериментальные данные только КА «GOES 10» для усредненных интегральных потоков релятивистских (> 2 МэВ) электронов [2], тогда величина PE = 0.9913. Предложенные формулы позволяют для всего диапазона от 00 LT до 24 LT вдоль ГСО находить (прогнозировать), например, среднюю величину перпендикулярного интегрального потока релятивистских (> 2 МэВ) электронов за сутки, суточный флюенс, а также предсказывать на сутки вперед на ГСО максимальный перпендикулярный интегральный поток релятивистских электронов, если известен поток в полночь.

1. Turner D.L., Li X., Burin des Roziers E., Monk S. // Space Weather, 2011, V. 9, S06003, doi: 10.1029/2010SW000647.

2. O'Brien T.P. // Space Weather, 2009, V. 7, S09003, doi: 10.1029/2009SW000473.

ВАРИАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В 2021 ГОДУ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ЕНУ, КАЗАХСТАН

Тулеков Е.А.[1], Морзабаев А.К.[1], Махмутов В.С.[2], Ерхов В.И.[2], Филиппов М.В.[2]

[1]*Евразийский национальный университет им.Л.Н. Гумилева, г.Нур-Султан, Казахстан, yerzhan_ta@mail.ru*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва, Россия*

С целью изучения вариаций потоков вторичных космических лучей, в т.ч. вызванных атмосферными процессами, в 2015-2018 гг. на физико-техническом факультете Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан, Республика Казахстан), в содружестве с Физическим институтом им. П.Н. Лебедева РАН, был создан научный космофизический экспериментальный комплекс, состоящий из детектора заряженных частиц CARPET, нейтронного детектора и электростатического флюксметра EFM-100.

В данной работе исследуются вариации вторичных космических лучей в связи с изменениями характеристик приземного электрического поля и метеорологических параметров приземной атмосферы.

Данные наземного комплекса позволяют проводить исследования природы вариаций космических лучей на разных временных масштабах и могут качественно дополнить мировой банк данных наряду с данными существующей сети наземных детекторов потоков вторичных космических лучей. Экспериментальные данные комплекса размещены в открытом доступе на сайте университета.

СВЯЗЬ ПОЛЯРИЗАЦИИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ Pc1 С ПОЛОЖЕНИЕМ ИХ ИСТОЧНИКА

Фейгин Ф.З., Клейменова Н.Г., Малышева Л.М., Хабазин Ю.Г., Громова Л.И.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, feygin@ifz.ru, ngk1935@yandex.ru

Рассмотрено распространение геомагнитных пульсаций *Pc1* от области их генерации в магнитосфере до наземного приемника, включая ионосферный волновод (в слое F2), в котором магнитосферные альвеновские, т.е. лево-поляризованные, волны трансформируются в быстрые магнитозвуковые, т.е. право-поляризованные, волны. На земной поверхности вблизи проекции источника *Pc1* будет наблюдаться левая поляризация волн, а на значительном удалении – правая. На большом массиве данных наблюдений (более 200 событий *Pc1*) исследованы особенности широтного распределения поляризации *Pc1*-пульсаций на финском меридиональном профиле на широтах 57°–66° MLAT. Анализ событий с четкой левой или правой поляризацией показал, что, как правило, в окрестностях возможной проекции плазмопаузы (наиболее вероятной области генерации геомагнитных пульсаций *Pc1*) наблюдались лево-поляризованные волны, которые с увеличением расстояния заменялись право-поляризованными волнами в том же диапазоне частот. Это позволило высказать предположение, что левая поляризация *Pc1*-волн на земной поверхности может быть индикатором положения проекции их источника.

Работа выполнена в рамках государственного задания института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

УЧЕТ КОНЕЧНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЛАЗМЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ГОРЯЧИХ ПРОТОНОВ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ НА РАЗВИТИЕ ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Фейгин Ф.З., Хабазин Ю.Г.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, feygin@ifz.ru

Выведено аналитическое выражение для инкремента с учетом конечного плазменного давления протонов (β) радиационного пояса для исследования циклотронной неустойчивости УНЧ волн в магнитосфере Земли, которое существенно отличается от аналогичных выражений, не учитывающих конечного плазменного давления

Показано, что при увеличении β инкремент нарастания γ существенно уменьшается и при достижении значений декремента затухания (δ) процесс генерации УНЧ волн может прекратиться. Для генерации УНЧ волн необходимы малые значения β, которые характерны для низкой магнитной активности. Это позволяет объяснить тот наблюдаемый факт, что для появления *Pc1* пульсаций на земной поверхности наиболее благоприятна именно низкая магнитная активность.

В этом и заключаются особенности генерации УНЧ волн в магнитосфере Земли при учете влияния конечных значений плазменного давления горячих частиц β, которые не рассматривались в предыдущих работах по аналогичной тематике.

Работа выполнена в рамках государственного задания института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

КАТАЛОГ СТАБИЛЬНЫХ КРАСНЫХ ДУГ ДАНИЭЛЯ БАРБЬЕ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ВО ВРЕМЯ МГГ 1957 - 1959 Г., И ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПРИ ИХ РАЗВИТИИ

Халипов В. Л.(1), Леонович А.(2) С., Сайбек Д.(3)

(1) ИКИ РАН, Москва, Россия, khalipov@iki.rssi.ru
(2) ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия
(3) NASA/GSFC, Greenblt, MD, USA

В течение МГГ, 1957-1959 г., французский астроном Daniel Barbier с помощью высокочувствительной аппаратуры проводил измерения зодиакального свечения ночного неба на обсерватории Hout Provance, расположенной на L оболочке 2.1. Им были обнаружены необычайно яркие дуги свечения атмосферы в линии атомарного кислорода 630.0 нм (SAR-arc). Свечение было однородно по структуре и наблюдалось в течение многих часов в большом диапазоне долгот. Спектрометр осуществлял круговое сканирование под углом 45 градусов к горизонту. Пример таких измерений приведен на Рис.1 (Ann. Geophys., 14, 334, 1958). При этом обычные полярные сияния наблюдались у северного горизонта. Мы составили каталог событий из обширного числа измерений. Сопоставление с Dst вариациями за 1957-1959 годы показывает, что красные дуги наблюдаются на любой фазе геомагнитной бури. В 1971 г был предложен механизм формирования SAR-arc при разогреве фоновых электронов ионно-циклотронными волнами, которые генерируются энергичными ионами водорода и кислорода кольцевого тока в приэкваториальной области (JGR, 76, 4428, 1971). Однако, последовавшие затем экспериментальные работы показали, что этот процесс может создать SAR-arc с интенсивностью до 3 кР. В начале 2000 годов возобладала точка зрения, что Daniel Barbier при своих измерениях ошибся в 100 раз! Авторы доклада как раз подтверждают достоверность измерений Daniel Barbier. 8 июля 1958 года визуально наблюдалась дуга огромной интенсивности. Небо пылало, и ночью было светло как днем, но только в красном свете. Во время МГГ были возмущения со значениями Dst-индекса 450-500 нТ. Плазмопауза смещалась до L=2.0 и именно сюда приходили из солнечного ветра альвеновские волны, концентрировались в узком диапазоне L-оболочек и создавался режим стоячих волн.

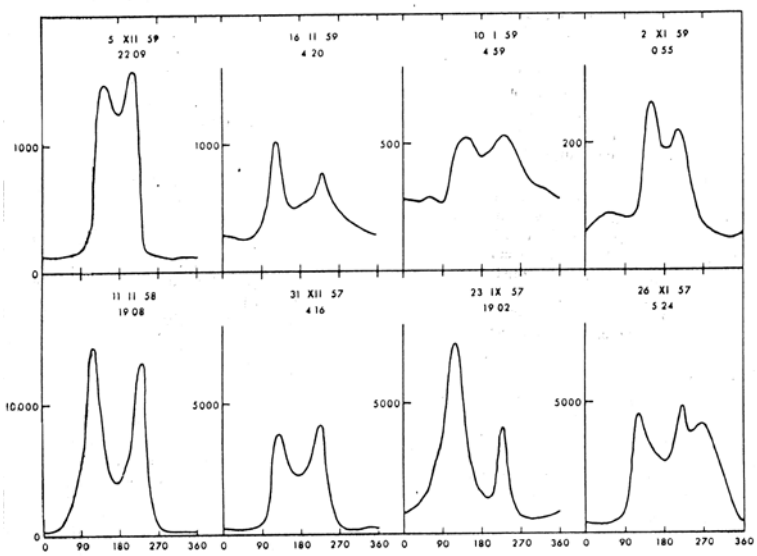


Рис.1 Измерение интенсивности красных дуг фотометром, сканирующим под углом 45 градусов к горизонту для различных событий. Шкала линейная в Рэлеях.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАНЗИТНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ В ЛИНИИ МЕТАСТАБИЛЬНОГО ГЕЛИЯ АТМОСФЕРОЙ ПЛАНЕТЫ GJ 436 b

Шепелин А.В., Руменских М.С., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, 4.shepelin@gmail.com

Численное моделирование атмосфер экзопланет является актуальным в свете глобальных масштабов наблюдательных данных, интерпретация которых необходима для понимания процессов, происходящих в системах звезд с экзопланетами. Наиболее распространёнными объектами для исследования атмосфер являются горячие юпитеры из-за совокупности следующих факторов, определяющих интенсивное взаимодействие звезды (в первую очередь, её излучения) с атмосферами горячих юпитеров: пространственная конфигурация, характеризующая близость планеты к звезде (орбита ~ 0.05 а.е.), значительный радиус и масса планет (много больше, чем у суперземли), а также относительно обширный диаметр газовых оболочек таких планет. Как следствие, спектральные транзитные наблюдения за экзопланетами IV и V класса по системе Сударского предоставляют значительное количество информации для уточнения различных характеристик наблюдаемых объектов. Однако, одних лишь наблюдений недостаточно для формирования физической картины газовых оболочек удалённых планет – на настоящий момент лишь моделирование, учитывающее комбинацию большого количества возможных явлений (гидродинамические и электродинамические эффекты атмосферы, фотохимические эффекты и т.д.), может дать наиболее точные структурные характеристики.

В 2004 году была обнаружена экзопланета GJ 436 b, первые спектральные измерения которой были получены в линии Ly-α [1]. По спектрально разрешённым и фотометрическим транзитам в окрестности данной линии удалось обнаружить интенсивное истечение планетарного вещества. Всё же, данная линия поглощается в межзвёздной среде и подвержена искажениям при прохождении через атмосферу, что мотивировало развитие наблюдений в других спектральных линиях.

Линия метастабильного гелия (2^3S) не обладает вышеобозначенными недостатками – среда распространения излучения практически не содержит атомов, поглощающих фотоны с соответствующими частотами, а спектр не деформируется столь значительно при прохождении через Земную атмосферу, что позволяет использовать наземные телескопы для изучения интересующего спектра. В работе [2] впервые был проведен анализ поглощения метастабильного гелия в атмосфере горячих юпитеров. Результаты численного моделирования предсказали поглощение на уровне 8% для планеты GJ 436 b, однако наблюдения [3] показали значительно меньшее поглощение.

В ходе выполнения данной работы удалось реализовать моделирование поглощения в линии метастабильного гелия в атмосфере экзопланеты GJ 436 b, а также предпринята попытка интерпретировать аномально низкое поглощение в линии метастабильного гелия в рассматриваемом объекте (использована развивающаяся модель, описанная в [4]). Результаты численного моделирования показали, что такой низкий уровень поглощения связан с особенностями строения атмосферы и фотохимическими процессами, влияющими на заселённость уровня метастабильного гелия.

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

1. Ehrenreich D., Bourrier V., et al. // Nature 2015. V. **522**. P. 459.
2. Oklopčić A., Hirata C.M. // ApJL 2018. V. **855**. P. L11.
3. Nortmann L., Palle E., et al. // Science 2018. V. **362**. P. 1388.
4. Shaikhislamov I.F., Khodachenko M.L., et al. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2021. V. **500**. P. 1404.

ТРАНСПОРТ МАГНИТНЫХ ДЫР ЧЕРЕЗ УДАРНУЮ ВОЛНУ ЗЕМЛИ

Юшков Е.В., Артемьев А.В., Петрукович А.А.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, yushkov.msu@mail.ru

Одним из наиболее важных объектов космической плазмы являются ударные волны. Одной из наиболее удобных для изучения ударных волн является головная ударная волна Земли. В докладе пойдет речь о транспорте через ударную волну Земли одного вида когерентных структур солнечного ветра, называемых магнитными дырами и представляющих собой структуры «сжатия» с продольной вариацией магнитного поля. Нами будут продемонстрированы первые результаты анализа статистики магнитных дыр ионного масштаба, одновременно наблюдаемых в солнечном ветре аппаратами спутниковой миссии ARTEMIS и в магнитослое спутниками THEMIS и MMS. Будет проанализирована эволюция пространственных масштабов таких структур (абсолютных и относительных) и амплитуд магнитного поля при транспорте через ударную волну. На примере полученных соотношений будет проведено разграничение между магнитными дырами, сгенерированными локальными неустойчивостями магнитослоя, и дырам, попавшими в магнитослой из солнечного ветра. Данная проблема важна как для понимания структуры ударной волны и возможностей транспорта через нее когерентных структур, так и для изучения рассеяния и ускорения ионов на таких структурах в магнитослое, а также в общем случае и для построения предсказательных моделей вклада структур солнечного ветра в динамику магнитосферы Земли.

НЕКОТОРЫЕ ТЕХНОГЕННЫЕ ЯВЛЕНИЯ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫЕ МАГНИТОМЕТРАМИ В ХОДЕ ЭКСПЕРИМЕНТА ОБСТАНОВКА -1 ЭТАП НА РОССИЙСКОМ СЕГМЕНТЕ МКС.

В.А.Грушин[1], С.И.Климов[1], В.Е.Корепанов[2], Ш.Салаи[3], П.Сёгеди[4] , И.Э.Белова[1], Л.Д.Белякова[1], Т.В.Гречко[1], Д.И.Новиков[1], Л.А.Осадчая[1]

1- ИКИ РАН, Москва, 2- ЛЦ ИКИ АН Украины, 3-Универистет им.Ётвёша, Венгрия, 4-Фирма BL-Electronics, Венгрия.

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

В составе магнитно-волнового комплекса эксперимента Обстановка - 1 этап[1] работали четыре магнитометра, два из которых - низкочастотные - осуществляли измерения с частотой от 1 Гц до 32 Гц и два - среднечастотные, осуществляли измерения с опросностью 40 кГц.

Наряду с наблюдением радиомаяков, сигналы от которых фиксировались как на средних частотах (около 11 кГц), так и на низких частотах (единицы Гц), особый интерес представляют периодические скачкообразные изменения магнитного поля(Рис.1.), связанные, как нам кажется, с работой массива солнечных батарей МКС. Поскольку батареи управляются с поддержанием оптимального угла освещения Солнцем, величина скачков изменяется в небольших пределах, при этом составляя значительную величину. Интересным представляется сопоставление известной средней производительности массива солнечных батарей и величины изменения магнитного поля при переходах станции из тени на Солнце и обратно.

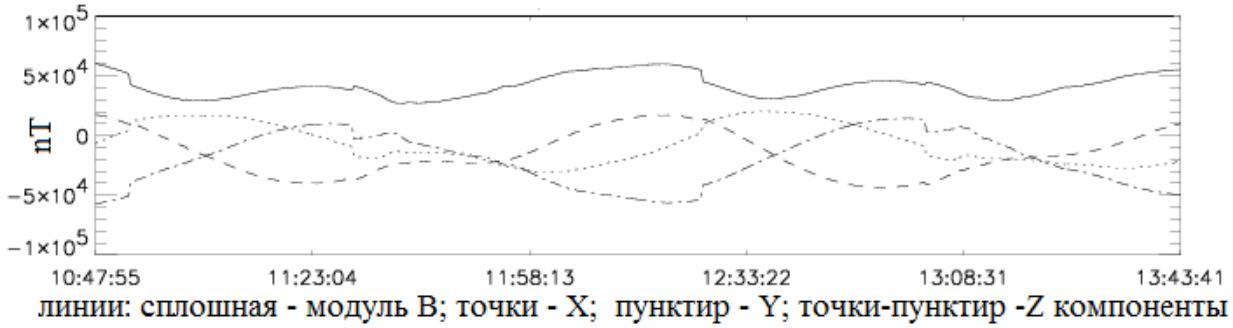


Рис.1. Пример измеренного магнитного поля.

1. С.И. Климов, В.А. Грушин, К. Балайти и др. Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперементе «*Обстановка (1 этап)*» на Российском сегменте МКС // Космическая техника и технологии № 1(32)/2021, с.20-41.

АНАЛИЗ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ДИСКРЕТНЫМИ ЧАСТОТАМИ ИАР ПО НАБЛЮДЕНИЯМ В 24-м СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

Потапов[1] А.С., Гульельми А.В. [2], Клайн Б.И. [3]

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

2 ИФЗ РАН, Москва, Россия, guglielmi@mail.ru

3 ГО Борок ИФЗ РАН, Борок Ярославской обл., Россия, klb314@mail.ru

Недавно было показано [1, 2], что в ионосферном альвеновском резонаторе (ИАР) может существовать два типа стоячих альвеновских волн. Первый из них (тип 1) соответствует случаю, при котором волновая структура достаточно однородна в поперечном к геомагнитному полю направлению, так, что $\Lambda > h$, где Λ — характерный масштаб поперечной неоднородности, а h — толщина воздушной прослойки между ионосферой и землей. Поле первого типа стоячих волн проникает к земной поверхности. Нижней стенкой резонатора в этом случае служит поверхность земли, а не нижняя ионосфера. Благодаря высокой проводимости земли здесь возникает пучность магнитного поля. Тип 2 стоячих альвеновских волн возникает при $\Lambda < h$, то есть, при сильной неоднородности волновой структуры в поперечном направлении. В этом случае волна не может проникнуть через воздушную прослойку, и нижней границей такого типа стоячих волн будет служить ионосфера. На земле при этом колебания наблюдаться не могут.

Измерения гармоник ИАР позволяют установить, имеет ли место пучность или узел на нижней границе. В первом случае частоты гармоник соотносятся как ряд нечетных чисел 1:3:5:7:9… (рис. 1а), во втором — как натуральный ряд чисел 1:2:3:4:5…(рис. 1б).

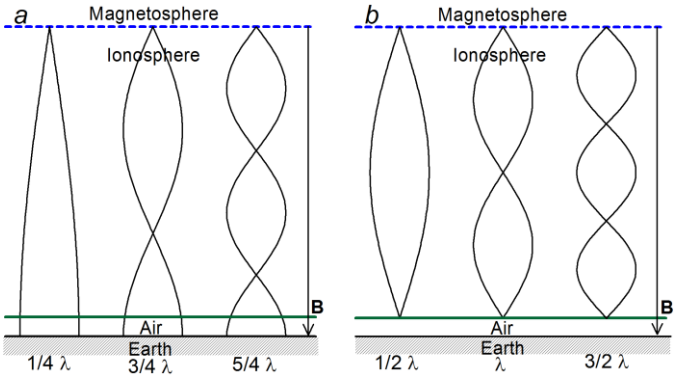


Рис. 1. Два типа структуры стоячих альвеновских волн в ИАР.

На основе наземных наблюдений ИАР в обс. Монды с 2009 по 2019 гг. мы показали, что все отношения частот спектральных полос, как и их обобщенные значения в виде детерминантов треугольных матриц, составленных из отношений частот первых пяти гармоник, оказываются намного ближе к значениям, ожидаемым для типа 1 структуры стоячих альвеновских волн в ИАР, чем для типа 2.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00280.

1. Guglielmi A.V. et al. // *arXiv:2105.01871 [physics.geo-ph]*. 2021.

2. Potapov A.S. et al. // *IEEE TGRS*. 2022. DOI: 10.1109/TGRS.2021.3092738.

ЭКВАТОРИАЛЬНЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ ПУЗЫРИ: ШИРОТНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗНЫХ ВЫСОТ

Л.Н. Сидорова

Исследован характер изменчивости широтных распределений вероятности наблюдения экваториальных плазменных пузырей (equatorial plasma bubbles, EPB) с ростом высоты наблюдения. Для этого использованы данные спутников ISS-b (~972−1220 км), ROCSAT-1 (~600 км) и AE-E (~300 км,~350–475 км) на разных орбитальных высотах. Рассматривались разные сезоны в годы повышенной и максимальной солнечной активности. 1. Показано, что широтные распределения вероятности наблюдения EPB на высотах их генерации в основных чертах повторяются на высотах верхней ионосферы (~972−1220 км). Эта характеристика обнаружена благодаря тому, что на высотах верхней ионосферы EPB регистрировались не по обеднению в суммарной ионной или электронной плотности, а как структуры с пониженной концентрацией в ионах гелия He^+. 2. Обнаружено, что в широтных распределениях вероятности наблюдения EPB с ростом высоты регистрации (от ~600 км до ~1000 км) помимо центрального (экваториального) максимума развиваются дополнительные среднеширотные максимумы. Эта особенность наиболее ярко проявляется в обоих полушариях в периоды равноденствий и в зимних полушариях. 3. Выявлено, что положения среднеширотных максимумов сдвигаются к экватору с ростом высоты наблюдения. Это хорошо согласуется с пространственным (широтно-высотным) ходом магнитных силовых трубок, вдоль которых "вытянуты" плазменные пузыри, достигшие своих предельных высот.

КОЭФФИЦИЕНТ ПОГЛОЩЕНИЯ ДЕЦИМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН (~19 СМ) В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ В РАДИОЗАТМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ В ИЮНЕ 2015 ГОДА

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

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

По результатам анализа измерений спутников *FORMOSAT-3/COSMIC*, выполненных во время магнитной бури в июне 2015 года, обнаружено поглощение дециметровых радиоволн (длина волны ~19 см) в нижней ионосфере высоких широт Земли. Величина интегрального поглощения на трассах радиозатменного зондирования высокоорбитальный (*GPS*) – низкоорбитальный (*COSMIC*) спутники составляет~3 дБ в интервале высот 60–90 км и в отдельных случаях достигает ~10 дБ на высотах от ~90 до ~95 км [1, 2]. Предложена методика восстановления вертикальных профилей коэффициента поглощения дециметрового сигнала в ионосфере Земли путём решения обратной задачи о поглощении радиоволн. Надёжно идентифицированы ионосферные слои поглощения, обусловленные геомагнитными условиями и мощными всплесками рентгеновского излучения во время магнитной бури. Найдено, что в отдельных сеансах радиоондирования на высотах от ~90 до ~100 км величина коэффициента поглощения дециметровых радиоволн достигает значений $(5.69 \pm 1.35)\cdot 10^{-3}$ дБ/км. Практическая значимость изучения эффектов поглощения радиоволн в ионосфере Земли связана с обеспечением бесперебойной работы систем космической радиосвязи и навигации.

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

Список литературы

1. Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A., Gubenko D.V. Radio Occultation Studies of Disturbances in the Earth's Ionosphere During a Magnetic Storm on June 22–23, 2015 // Geomagnetism and Aeronomy. 2021. V. 61. No. 6. P. 810–818, doi: 10.1134/S0016793221060050.

2. Gubenko V.N., Andreev V.E., Kirillovich I.A., Gubenko T.V., Pavelyev A.A. Variations in the Parameters of Radio Waves in the Earth's High-Latitude Ionosphere on the Satellite–Satellite Paths during the Geomagnetic Storm of June 22–23, 2015 // Cosmic Research. 2021. V. 59. No. 3. P. 157–161, doi: 10.1134/S0010952521030047.

МУЛЬТИИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЮ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ДЖЕТА

Синевич А.А.[1], Чернышов А.А.[1], Чугунин Д.В.[1], Ойнац А.В.[2], Милох В.Я.[3], Могилевский М.М.[1]

1.ИКИ РАН, г. Москва, Россия

2.ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

3. Университет Осло, г. Осло, Норвегия

Как известно, поляризационный джет (ПД) - узкая струя быстрых ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах верхней области ионосферы F-слоя, возникающая во время повышенной геомагнитной активности. Механизм формирования поляризационного джета, а также структура мелкомасштабных неоднородностей внутри ПД являются открытыми вопросами. В настоящей работе мы изучаем пространственную структуру ПД в субавроральной ионосфере, используя мультиинструментальный подход: спутниковые наблюдения NorSat-1, DMSP и Swarm, а также данные радаров сети SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) во время геомагнитной бури. Приведен сравнительный анализ параметров плазмы и спектров электронной концентрации внутри ПД по данным обоих спутников. Наши результаты показывают, что флуктуации параметров плазмы внутри ПД увеличиваются на всех масштабах с развитием геомагнитной активности. Обнаружены мелкомасштабные неоднородности в ПД с пространственными размерами до сотен метров. Роль крупномасштабных эффектов в ПД возрастает по сравнению с мелкомасштабными во время геомагнитной активности. ПД состоит из структур размером ~0.2 широты, внутри которых присутствуют мелкомасштабные неоднородности.

МНОГОЛУЧЕВОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДКМ ДИАПАЗОНА НА СУБАВРОРАЛЬНЫХ РАДИОТРАССАХ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ

Рогов Д.Д.

ФГБУ «ААНИИ», г. Санкт-Петербург, Россия, rogovdenis@mail.ru

Использование метода наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) является эффективным средством исследования высокоширотной ионосферы и условий распространения радиоволн ДКМ (КВ) диапазона. Для исследования ионосферы в Арктическом регионе РФ развернута сеть наклонного зондирования.

Проведен анализ параметров многолучевости сигналов распространения радиоволн на примере 2х трасс наклонного зондирования ионосферы, расположенных в субавроральной зоне, для периодов максимума и минимума 24 цикла солнечной активности. Рассматривались данные трасс НЗИ Ловозеро (68˚ N 35.02˚ E) – Горьковская (60.27˚ N 29.38˚ E) и Салехард (66.52˚ N 66.67˚ E) – Горьковская (60.27˚ N 29.38˚ E). Первая трасса имеет протяженность 900 км, скорректированные геомагнитные координаты центральной точки отражения 60.9˚ N 108.4˚ E, а вторая - протяженность 1950 км, скорректированные геомагнитные координаты центральной точки отражения 61.4˚ N 121.2˚ E.

Выявлены основные параметры многолучевости и диапазонов минимальной многолучевости в спокойных, средневозмущенных и сильновозмущенных геофизических условиях. Показана роль уровня солнечной активности, сезона, времени суток, высокоширотных спорадических Es слоев и аврорального поглощения на модовую структуру сигналов распространения радиоволн для рассматриваемых трасс НЗИ.

Работа выполнена в рамках плана научно-исследовательских и технологических работ НИУ Росгидромета, п. 6.1. «Развитие и модернизация технологий мониторинга геофизической обстановки на территорией Российской Федерации и Арктики.

МАКЕТ БЫСТРОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ИОНОЗОНДА НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ СИСТЕМ.

Моисеев С.П., Шиндин А.В., Грехнева К.К., Павлова В.А.

ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия, geothermalnn@mail.ru

Мониторинг динамических процессов в ионосферной плазме является одной из важнейших составляющих в исследованиях ионосферы. Это приводит к необходимости развития методов диагностики и диагностического оборудования для исследования ионосферных возмущений, что позволит получить новые научные результаты во время активных (нагревных) экспериментов при воздействии на ионосферу мощным КВ радиоизлучением.

Одним из распространенных методов мониторинга ионосферной плазмы является метод вертикального зондирования ионосферы, позволяющий изучать околоземное космическое пространство путем построения высотно-частотных характеристик (ионограмм) с последующим восстановлением профилей электронной концентрации. Этот метод подразумевает использование ионозонда вертикального зондирования – радиолокационной станции, работающей в КВ диапазоне.

Характерные времена процессов, происходящих в ионосфере в ходе нагревных экспериментов, составляют величину порядка 1 с. Существующие на рынке ионозонды не способны производить измерения с такой скоростью в виду ограниченного функционала. Кроме того, комплексная диагностика ионосферы с использованием нескольких ионозондов значительно затруднена в связи со высокой рыночной стоимостью (5-20 млн. рублей) подобных устройств. В связи с этим, возникла задача создания устройства вертикального зондирования ионосферы на основе современных бюджетных программно-аппаратных средств.

В докладе представлены результаты разработки макета ионозонда вертикального зондирования, позволяющего регистрировать ионограммы за время порядка 1 секунды с минимальной себестоимостью компонентов при сохранении технических характеристик на уровне современных коммерческих аналогов.

В разработанном макете ионозонда нами были использованы электронные компоненты доступные в свободной продаже, что обеспечило его низкую себестоимость, около ста тысяч рублей. А в классическую схему излучения устройства были внесены изменения, которые обеспечили время регистрации ионограммы – 0,9 с.

Испытания макета вертикального ионозонда производились как в лабораторных условиях, так и на экспериментально-опытной базе «Васильсурск», располагающей необходимым передающим и приемным оборудованием. Использование штатных приемной и передающей антенн вертикального ионозонда CADI позволило максимально честно сопоставить результаты регистрации ионограмм, полученные разработанным макетом и профессиональным ионозондом.

Полученные в ходе испытаний результаты, говорят о том, что представленная концепция ионозонда с учетом низкой ожидаемой конечной стоимости будет иметь спрос в научной среде, поэтому ближайшей целью проекта является разработка и испытание прототипа будущего прибора.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 21-72-10131.

РАЗВИТИЕ МЕТОДА РЕЗОНАНСНОГО СВЧ-ЗОНДА В ДИАГНОСТИКЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЫ

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

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

Работа посвящена развитию диагностических возможностей резонансного СВЧ-зонда применительно к исследованию параметров магнитоактивной плазмы. Зонд с СВЧ-резонатором, ориентированный вдоль внешнего магнитного поля, выполнен на четвертьволновом отрезке двухпроводной линии, один конец которого замкнут, другой разомкнут. В процессе проведения экспериментов было установлено, что резонанс определялся показателем преломления холодной магнитоактивной плазмы для необыкновенной волны, распространяющейся вдоль магнитного поля. Эксперименты проводились на плазменном стенде «Ионосфера» в широком диапазоне концентраций распадающейся плазмы. Измеренные значения концентрации в диапазоне пять порядков 10^6-10^{11} см$^{-3}$ с хорошей степенью точности согласуются с результатами, полученными поверочным методом.

Резонансный отклик зонда при изменении частоты электромагнитного сигнала и дисперсионные свойства необыкновенной волны позволили осуществить контроль параметров плазмы и апробировать методику измерения электронной концентрации заряженных частиц N_e и индукции внешнего магнитного поля B. Предложен оригинальный метод определения B по уменьшению амплитуды резонанса вблизи электронно-циклотронной частоты f_{ce}, что связано как со столкновительными потерями внутри циклотронной линии, так и с дополнительными радиационными потерями энергии резонатора. Эффект исчезновения резонанса зонда вблизи f_{ce} позволил измерить величину B с высокой точностью порядка 1%. На основании экспериментальных результатов и анализа дисперсионного уравнения для собственных волн в магнитоактивной плазме установлено, что в окрестности циклотронного резонанса основной поток электромагнитного излучения открытого конца резонатора направлен перпендикулярно силовым линиям внешнего магнитного поля. Для измерения значений N_e распадающейся плазмы на зонд подавался сигнал на частоте как больше, так и меньше «вакуумной». Впервые в качестве независимого способа предложен метод третьей гармоники того же резонатора, где влияние магнитного поля на дисперсию волн мало. Также при увеличении подводимой мощности исследовались нелинейные эффекты выталкивания плазмы из области сильного СВЧ-поля резонатора, что может приводить к недостоверным показаниям датчика. Показано, что уменьшение концентрации плазмы вблизи СВЧ-зонда обусловлено воздействием на заряженные частицы преимущественно продольной составляющей пондеромоторной силы.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект No 0030-2021-0028).

ПЕРСПЕКТИВЫ ТОМОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ИОНОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

Андреева Е.С., Падохин А.М., Назаренко М.О.

МГУ им М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, padokhin@physics.msu.ru

В докладе рассматриваются физические и математические постановки задачи томографии в приложении к дистанционному зондированию верхней атмосферы и околоземного космического пространства. Особое внимание уделено зондированию ионосферы с использованием низкоорбитальных полярных спутников. Обсуждаются возможности и ограничения методов 2D низкоорбитальной радиотомографии ионосферы и приводятся результаты радиотомографических реконструкций распределения электронной концентрации в различных широтах в условиях естественной и искусственной возмущенности. Отдельно рассматривается задача исследования мелкомасштабных ионосферных неоднородностей по данным о мерцаниях амплитуды спутниковых сигналов. Также обсуждаются перспективы томографических систем зондирования верхней атмосферы с учётом сильно сократившейся группировки низкоорбитальных спутников и планируемого вывода на орбиту спутников “Ионосфера”, а также возможности установки спутниковых радиомаяков на новые платформы (CubeSat) и совместного использования данных радио- и УФ-томографии верхней атмосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда проект № 22-27-00396.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОЦЕНОК ЧАСТОТЫ ДЕВИАЦИИ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЙ

Данильчук Е.И.[1], Демьянов В.В.[1,2], Ясюкевич Ю.В.[1,2], Сергеева М.А.[3]

[1] Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия, danilchuk.k@mail.ru
[2] Институт Солнечно-Земной физик СО РАН, г. Иркутск, Россия, sword1971@yandex.ru
[3] CONACyT, SCiESMEX, LANCE, Instituto de Geofisica, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Mexico, maria.a.sergeeva@gmail.com

Сигналы глобальных навигационных спутниковых систем являются высокоинформативным средством для радиозондирования ионосферы. При этом одним из основных измеряемых параметров навигационных сигналов является фаза несущей, поскольку она обладает высокой потенциальной чувствительностью к слабым ионосферным событиям. Данная чувствительность во многом определяется тем, насколько точно установлена граница между вариативной частью спектра мерцаний фазы и областью неинформативных шумов. McCaffrey and Jayachandran [1] предлагают термин «частота девиации» для обозначения границы разделения этих двух областей. Опираясь на идею указанной работы, мы полагаем, что целесообразно ввести понятие характерной частоты девиации за период наблюдений. Этот термин подразумевает наиболее вероятную частоту девиации в текущих локальных условиях наблюдения ионосферы.

В данном исследовании представлена оценка характерной частоты девиации в зависимости от типа спутниковой навигационной системы, несущей частоты, вида сигнальных компонент, времени суток и уровня геомагнитной активности.

Оценка частоты девиации проведена на пункте измерений Института солнечно-земной физики СО РАН (52,24 с.ш., 104,26 в.д.) Измерения фазы несущей сигналов навигационных спутников GPS, ГЛОНАСС и GALILEO, а также геостационарных спутников SBAS, проводились в спокойных условиях (13 апреля 2021 г.) и в условиях слабого геомагнитного возмущения (16 апреля 2021 г.). Для проведения измерений использовался навигационный приемник сигналов GNSS Javad Delta-G3T с частотой регистрации измерений 50 Гц, который является частью сети SibNet [2].

Результаты наблюдений частоты девиации показали, что эта величина изменяется в пределах 15-22 Гц. Характерная вероятная частота девиации для сигналов равна 20 Гц. Эти оценки относятся к сигналам и сигнальным компонентам навигационных систем GPS, GLONASS и GALILEO. В то же время оценки частоты девиации по сигналам геостационарных спутников SBAS варьируются в пределах 13-20 Гц. При этом для данных спутников не всегда можно однозначно определить наиболее вероятное значение частоты девиации. Характерная частота девиации в большинстве случаев оказалась достаточно стабильной на коротких интервалах времени наблюдений (1 час). Однако в течение суток ее величина может существенно варьироваться (от 15 до 22 Гц) [3].

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-77-20005.

1. McCaffrey, A.M., Jayachandran, P.T. Spectral characteristics of auroral region scintillation using 100 Hz sampling. GPS Solut 21, 1883–1894 (2017). https://doi.org/10.1007/s10291-017-0664-z

2. Yasyukevich Yu.V., Vesnin A.M., Perevalova N.P. SibNet – Siberian Global Navigation Satellite System Network: Current state. Solar-Terrestrial Physics. 2018. V. 4. N 4. P. 63–72. DOI: 10.12737/stp-44201809.

3. Demyanov, V.; Danilchuk, E.; Yasyukevich, Y.; Sergeeva, M. Experimental Estimation of Deviation Frequency within the Spectrum of Scintillations of the Carrier Phase of GNSS Signals. Remote Sens. 2021, 13, 5017. https://doi.org/10.3390/rs13245017

РЕАКЦИЯ ФОНОВОГО ОПТИЧЕСКОГО СВЕЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ И ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ 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

В экспериментах по исследованию воздействия на ионосферу мощной радиоволной методом многочастотного допплеровского зондирования на стенде СУРА было обнаружено и детально исследовано вытеснение плазмы из области верхнегибридного резонанса (ВГР) волны накачки [1]. Ранее, чем из области верхнегибридного резонанса, возникало вытеснение из области отражения, оно было более слабым и исчезало после развития процессов в области верхнегибридного резонанса. В 2014 году серия экспериментов по аналогичной методике была проведена на стенде HAARP. Было установлено, что при больших мощностях воздействия (мощность стенда HAARP приблизительно в 10 раз превышает мощность стенда СУРА) в течение всего времени воздействия сохраняются обе области вытеснения [2].

Эффекты вытеснения могут быть связаны как со стрикционным (усредненным высокочастотным) давлением плазменных волн, так и с увеличением газокинетического давления вследствие нагрева электронов плазменными волнами. Плазменные волны, в свою очередь, возникают на высотах отражения и верхнегибридного резонанса вследствие возбуждения параметрических неустойчивостей при воздействии волны накачки на ионосферу [3,4].

Для того чтобы исследовать конкуренцию этих двух эффектов в формировании профиля электронной концентрации были проведены модельные расчеты модификации профиля электронной концентрации на основе теоретической модели, описывающей динамику поведения электронной температуры и концентрации в *F*-области ионосферы при воздействии мощной радиоволны на ионосферу. Для описания концентрации плотности плазмы было использовано одномерное (вдоль магнитного поля) уравнение амбиполярной диффузии с учетом термодиффузии и стрикционного давления плазменных волн, для электронной температуры использовалось уравнение теплопроводности с источником, связанным омическим нагревом электронов и плазменными волнами. Для простоты полагалось, что плотность энергии плазменных волн, как в точке отражения, так и в области ВГР одинаково связана с интенсивностью волны накачки и имеет одинаковую пространственную структуру по высоте. При этом не учитывалось аномальное ослабление волны накачки.

Установлено, что выдавливание за счет стрикционного давления развивается более быстро и ответственно за формирование локальных областей пониженной концентрации вблизи плазменных резонансов, тогда как газокинетическое давление ответственно за более медленное по времени, а также более протяженное и плавное по координате образование области пониженной концентрации. Ранее полагалось [3], что основную роль в формировании областей пониженной концентрации играет вытеснение плазмы за счет газокинетического давления.

[1] Васьков В.В.. и др. // Письма в ЖЭТФ, 1986, Т. 43, № 11, с. 512.
[2] Alexey V. Shindin et all. // Remote Sensing, 13, 4895, 2021, https://doi.org/10.3390/rs13234895
[3] Димант Я.С. // В кн.: «Взаимодействие высокочастотных радиоволн с ионосферой» М.: ИЗМИРАН, 1989, с. 19-39.
[4] Грач С.М., Митяков Н.А., Шварц М.М. // Геомагнетизм и аэрономия, 1989, Т. 29, с. 453

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 20-12-00197 и № 21-72-10131.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИСКРЕТНЫХ СТРУКТУР ИОННЫХ ГИРОГАРМОНИК В СПЕКТРЕ УЗКОПОЛОСНОГО ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Калишин А.С., Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Йоман Т.К., Егоров И.М. Загорский Г.А.

ААНИИ Росгидромет, г. Санкт Петербург, Россия, askalishin@aari.ru

Результаты экспериментов на стенде HAARP продемонстрировали, что при воздействии мощного КВ радиоизлучения на ионосферную плазму могут возбуждаться различные спектральные компоненты узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы (УИРИ) в диапазоне частот порядка ±1 кГц относительно частоты волны накачки. Такие компоненты в спектре УИРИ регистрировались вблизи нагревного комплекса HAARP при воздействии на ионосферу мощной КВ радиоволны обыкновенной (О-мода) поляризации на частотах нагрева ниже критической частоты слоя F2.

Серия экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на стенде EISCAT/Heating, позволила впервые обнаружить, что при нагреве высокоширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами необыкновенной поляризации (Х-мода) на частотах как ниже, так и выше критической частоты слоя F2, аналогичные узкополосные спектральные компоненты регистрировались на значительном (более 1000 км) удалении от КВ нагревного комплекса.

В работе рассмотрены особенности дискретных структур ионных (для ионов O^+) гирогармоник в спектрах УИРИ, возбуждаемых волной накачки необыкновенной (Х-мода) поляризации. Результаты были получены в трех сериях экспериментов на стенде EISCAT/Heating на частотах излучения 5.423, 6.77 и 7.953 МГц, которые были ниже четвертой, пятой и шестой электронных гирогармоник соответственно. Волна накачки излучались в направлении вдоль магнитного поля с эффективной излучаемой мощностью 238–740 МВт. Дискретные спектральные компоненты УИРИ регистрировались на научно-исследовательской станции ААНИИ под Санкт-Петербургом на расстоянии1200 км от нагревного стенда комплекса.

Ионные гирогармонические структуры сосуществовали с мелкомасштабными искусственными ионосферными неоднородностями (МИИН), вытянутыми вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Сравнение результатов наблюдений радара некогерентного рассеяния, УИРИ и МИИН позволило сделать вывод, что в периоды Х нагрева происходит ускорение электронов как вдоль, так и поперек геомагнитного поля.

Предложены и обсуждаются возможные механизмы генерации дискретных структур в спектрах УИРИ, регистрируемых на значительном расстоянии от нагревного стенда. Первый - стимулированное рассеяние Бриллюэна при распаде мощной волны Х-поляризации на рассеянную электромагнитную и электростатическую ионно-циклотронную (для ионов O^+) волны. Второй связан со стимулированным рассеянием Бернштейна, при котором волна накачки распадается на высокочастотную электронную и низкочастотную ионную волны Бернштейна. В обоих механизмах могут реализовываться множественные распады, что приводит к развитию каскадного процесса возбуждения ионных дискретных гирогармонических структур.

ОПТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И СОПУТСТВУЮЩИЕ ЯВЛЕНИЯ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ *F*-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ НЕОБЫКНОВЕННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ НА ЧАСТОТАХ ВБЛИЗИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ

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

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

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик оптического излучения в красной (630 нм) и зеленой (557 нм) линиях атомарного кислорода и сопутствующих явлений в высокоширотной верхней (F-область) ионосфере, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации. Для модификации ионосферы использовался КВ нагревной стенд EISCAT/Heating в г. Тромсе, Норвегия (69.6ºN, 19.2ºE). Альтернативный X-нагрев на частотах 7.1 / 6.2 МГц проводился в магнитный зенит (диаграмма направленности антенны нагревного стенда наклонена к югу на 12°) циклами 5 мин нагрев, 2.5 мин пауза. Эффективная мощность излучения составляла *P*эфф = 460 - 600 МВт. В период эксперимента критическая частота слоя *F*2 (*foF*2) падала от 7.0 до 6.5 МГц. Оптические наблюдения проводились в Тромсе с помощью камеры всего неба DASI - 2. Регистрация искусственного оптического излучения проводилась одновременно с измерениями EISCAT радара некогерентного рассеяния (НР) радиоволн (на частоте 931 МГц), пространственно совмещенного с КВ нагревным стендом EISCAT/Heating, КВ доплеровского радара обратного рассеяния CUTLASS в Финляндии, а также наблюдениями узкополосного искусственного радиоизлучения ионосферы на удалении порядка 1200 км от нагревного стенда.

Результаты наблюдений показали, что X-нагрев вызывает возбуждение оптических излучений. В период эксперимента интенсивность оптических излучений в красной линии атомарного кислорода составляла 150 - 350 R, а в зеленой - 50 - 100 R. Искусственное оптическое излучение сопровождалось генерацией интенсивных продольных плазменных волн (ленгмюровских и ионно-акустических), которые непосредственно регистрировались в спектре радара НР как усиленные нагревом плазменные и ионные линии (HF-enhanced plasma and ion lines, HFPLs и HFILs) в течение всего цикла нагрева. HFPLs и HFILs наблюдались одновременно с мелкомасштабными искусственными ионосферными неоднородностями (МИИН) с поперечными к магнитному масштабами 7.5 - 15 м.

Установлено, что наиболее интенсивные оптические эмиссии наблюдались при X-нагреве на критической частоте слоя *F*2. При этом высота генерации оптических излучений происходила на высотах возбуждения искусственных ленгмюровской и ионно-акустической турбулентностей. Предполагается, что на генерацию явлений при X-нагреве высокоширотной *F*-области ионосферы могут влиять такие процессы как ускорение электронов в широком диапазоне высот, гидирование X-волны вдоль магнитного поля и отсутствие аномального ослабления.

СТИМУЛИРОВАННАЯ ИНЖЕКЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ ИЗ РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ В ИОНОСФЕРУ

Фролов В.Л., Рябов А.О., Болотин И.А.

НИРФИ ННГУ, Нижний Новгород, Россия, frolov@nirfi.unn.ru

В докладе приводятся результаты исследований характеристик инжекции энергичных электронов из радиационного пояса Земли в среднеширотную ионосферу при модификации её F_2-слоя мощными КВ радиоволнами, излучаемыми нагревным стендом СУРА. Обсуждаемые в работе измерения были выполнены с помощью низкоорбитальных спутников DEMETER и NOAA. Измерения проводились в различных геофизических условиях как над стендом, так и в магнитно сопряжённой стенду ионосфере. Были определены оптимальные условия нагрева ионосферной плазмы для стимуляции инжекции энергичных электронов и установлено, что зона высыпаний вытянута вдоль геомагнитного меридиана составляя до 1000 – 2000 км в продольном и 300 – 500 км в поперечном направлениях (с большими размерами в ночных условиях) и что наиболее интенсивные высыпания электронов с энергиями $\varepsilon \approx 100$ кэВ регистрировались при модификации F_2-слоя ионосферы в поздние вечерние и ночные часы. Установлено, что интенсивность инжекции в большей степени зависит от наполнения радиационного пояса энергичными электронами, чем от интенсивности искусственной ионосферной турбулентности (ИИТ).

Полученные экспериментальные данные продемонстрировали, что стимулированная модификацией ионосферной плазмы инжекция электронов с энергиями $\varepsilon \approx 100$ кэВ могут наблюдаться даже в дневных условиях при низких ($P_{эфф}^* \leq 3$ МВт) значениях приведённой эффективной мощности излучения ВН, когда ИИТ может иметь настолько низкий уровень своего развития, что не обнаруживается на ионограммах вертикального зондирования в виде F_{spread} и аномального ослабления зондирующих ионосферу радиоволн.

Дана оценка энергии, вносимой в ионосферу инжектируемыми энергичными электронами, которая при модификации ночной ионосферы в оптимальных условиях может достигать величины 500 кВт и больше, что сравнимо с ВЧ мощностью, генерируемой передатчиками стенда. В дневных условиях эта мощность не превышает 1 кВт.

Приведены примеры возможного влияния инжектируемых в ионосферу энергичных электронов на генерацию ИИТ и на свойства атмосферных процессов, которое проявляется: в изменении состояния ионосферной плазмы, в поглощении радиоволн в нижней ионосфере, в генерации крупномасштабных искусственных ионосферных неоднородностей концентрации плазмы, в возбуждении до ридберговских состояний атомов и молекул нейтральной атмосферы, которые, высвечиваясь, вызывают генерацию микроволнового излучения в широком диапазоне сантиметровых и дециметровых волн, в уменьшении содержания озона на мезосферных высотах и др. [3] Приведённые в работе результаты ясно показывают, что искусственная инжекция энергичных электронов из радиационного пояса Земли на ионосферные высоты имеет многоплановое сильное и легко обнаружимое своё влияние на генерацию и характеристики различных компонент ИИТ, а также — на свойства приземного слоя атмосферы Земли, причём это влияние регистрируется в большой области пространства, размеры которой намного превышают размеры интенсивной генерации первичной ИИТ. Всё это обуславливает интерес к продолжению такого рода исследований.

Исследования Фролова В.Л. выполнялись при поддержке РНФ (грант № 21-12-00385), Рябова А.О. — при поддержке РФФИ (грант № 20-05-00166а), Болотина И.А — при поддержке проекта Минобрнауки РФ № 0729-2020-0057.

1. Фролов В.Л., Акчурин А.Д. и др. // Изв. вузов. Радиофизика, 2019. Т. 62. С. 641.
2. Рябов А.О., Фролов В.Л., Акчурин А.Д. // Изв. вузов. Радиофизика, 2020. Т. 63. С. 285.
3. В.Л. Фролов, А.О. Рябов, Акчурин А.Д. // Космические исследования, 2022 (в печати).

ДИНАМИКА ИСКУССТВЕННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ И ИСКУССТВЕННОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА СТЕНДЕ АРЕСИБО ПРИ БОЛЬШИХ ВРЕМЕНАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ

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

ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия, xashev2013@gmail.com

Представлены результаты исследований искусственной ионосферной турбулентности на низкоширотном нагревном стенде (угол наклона геомагнитного поля к вертикали ≈ 40°) на среднеширотном нагревном стенде Аресибо (Пуэрто-Рико, США) 7–8 ноября 2018 г. с помощью одновременных измерений сигналов радара некогерентного рассеяния (на ленгмюровских волнах, плазменная линия) и искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ). Воздействие на ионосферу осуществлялось мощной радиоволной (волной накачки, ВН) обыкновенной (О) поляризации с эффективной мощностью излучения $P_Э$ ≈ 100 МВт вертикально вверх на частоте волны накачки (ВН) $f_{ВН}$ = 5095 кГц. Излучение ВН осуществлялось в различных режимах. В докладе представлены результаты обработки данных, полученных во время квазинепрерывного нагрева. Квазинепрерывный нагрев (длительность импульсов $\tau_и$ = 165 мс, период повторения $T_и$ = 200 мс) был осуществлен с длительностью посылок 15 секунд и 150 секунд. Для диагностики динамики искусственной плазменной линии радар некогерентного рассеяния излучал импульсы длительностью 440 мкс с нулевой секунды каждой минуты, модулированные псевдослучайной последовательностью, с периодом следования 10 мс на частоте f_r = 430 МГц. Результаты измерений ИРИ и плазменной линии при коротких импульсах ВН с большой скважностью ($\tau_и$ = 5–100 мс $T_и$ = 2–20 с) представлены в [1,2].

В результате проведенного анализа данных по пространственно-временной динамике искусственной плазменной линии установлено:

1. Наблюдается стабильно две области генерации искусственной плазменной линии – вблизи уровня отражения с первых миллисекунд до нескольких секунд наблюдаются спектры распадного типа с максимумами на отстройках 0, −4 кГц, связанных с развитием здесь ленгмюровской турбулентности (волновые вектора плазменных волн вдоль магнитного поля с последующей изотропизацией углового спектра, что делает их доступными для наблюдения) и, далее, на 2–3 км ниже по высоте вблизи уровня верхнегибридного резонанса. Здесь плазменные волны ортогональны магнитному полю Земли, но также наблюдаются вследствие изотропизации их спектра, наблюдаемые спектры плазменной линии качественно отличаются от ленгмюровских, обладая широкой формой типа континуум без резко выраженных максимумов. 2. Развитие верхнегибридной турбулентности плазменных волн приводит к экранировке генерации ленгмюровских волн через 15–30 секунд после включения ВН. 3. При дальнейшем увеличении времени нагрева до значений> 40 секунд может наблюдаться расслоение области генерации искусственной плазменной линии. Это утверждение требует проверки, поскольку здесь необходимо учитывать естественные вариации высот генерации плазменной линии и времена усреднения потока данных. 4. Сопоставление результатов наблюдений искусственной плазменной линии (для определенной длины волны плазменных волн) и ИРИ (для интегрального процесса высвечивания плазменных волн) показывают качественное подобие структуры спектров.

Работа выполнена при поддержке грантов РНФ № 20–12–00197 и № 21–72–10131.

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

2. Шиндин А.В. и др. // Пятнадцатая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе. 10–14 февраля 2020. ИКИ РАН. Тезисы докладов. Стр. 93.

ИСКУССТВЕННЫЕ ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ – РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА ОБНОВЛЕННОМ СТЕНДЕ СУРА

Бахметьева Н.В.[1], Сергеев Е.Н.[2], Виноградов Г.Р.[1,2], Жемяков И.Н.[1,2]

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

В работе представлены результаты новых экспериментов, связанных с исследованием ионосферы Земли на основе процессов развития и релаксации искусственных периодических неоднородностей (ИПН) ионосферной плазмы, формирующихся при воздействии на ионосферу мощным высокочастотным радиоизлучением. Эксперименты проводились в августе и сентябре 2021 г. на обновленном среднеширотном стенде СУРА (56,15 N; 46,11 E). Возмущение ионосферы производилось тремя передатчиками стенда синфазным излучением в зенит мощной необыкновенной либо обыкновенной радиоволны на частоте 4,3 МГц в квазинепрерывном режиме с эффективные мощностью 100–120 МВт. Такой режим нагрева с периодом 15 с позволяет исследовать процессы в ионосфере как во время развития ИПН, так и при их релаксации по окончании нагрева [1]. При этом на стадии развития неоднородностей регистрация сигнала, рассеянного неоднородностями, позволяет изучать особенности нагревных явлений во всей толще ионосферы от высот D-области до F-слоя включительно, а исследование процесса релаксации ИПН и, соответственно, рассеянного ими сигнала, позволяет определять большое количество параметров ионосферы и нейтральной атмосферы [1]. Управление временными режимами излучения стенда СУРА осуществлялось с помощью блока логической обработки, специально разработанного для передатчиков стенда СУРА [2]. Зондирование ИПН на стадии их релаксации осуществлялась переводом нагревного стенда в импульсный режим с излучением импульсов длительностью 50 мкс с частотой повторения 50 Гц на той же частоте и с той же поляризацией, что и при нагреве. Таким образом, стенд СУРА применялся в качестве и нагревного, и диагностического средства. Обратно рассеянные неоднородностями сигналы принимались антенной, состоящей из 24 скрещенных диполей с выделением радиоволн обеих круговых поляризаций. Квадратурные составляющие всех ионосферных сигналов регистрировались после каждого зондирующего импульса приемным устройством с полосой пропускания 1 МГц с помощью 14-рязрядного АЦП в течение всего периода развития и релаксации ИПН и записывались на ПК в реальном времени. Одновременно с регистрацией ИПН в пункте наблюдений каждые 15 минут работал ионозонд CADI. Сигналы, рассеянные неоднородностями, регистрировались при возмущении ионосферы радиоволнами обеих поляризаций. Во многих сеансах на стадии развития ИПН рассеянные сигналы занимали весь интервал высот от D-области до F-слоя, за исключением интервала высот 78–95 км, что обусловлено ростом концентрации атомарного кислорода, приводящим к росту скорости отлипания электронов от отрицательных ионов и фактическому прекращению образования ИПН на этих высотах. Определена высота нижней границы области, обогащенной атомарным кислородом, которая находилась в интервале 78–82 км.

Работа выполнена при поддержке РНФ по проекту № 20-17-00050. Бесперебойная работа стенда СУРА обеспечивалась в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по проекту № 0729-2020-0057.

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. Белов Ю.И., Сергеев Е.Н., Серкин А.Г., Черникова С.О., Рябов А.В. // Труды XXV научной конференции по радиофизике, (Нижний Новгород, 14–26 мая 2021 г.) – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2021. С. 146.

МИКРОВОЛНОВАЯ И ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЕННЫХ ОБЛАКОВ ПРИ ЛАБОРАТОРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ АКТИВНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ

Николенко А.С.[1], Гущин М.Е.[1], Коробков С.В.[1], Зудин И.Ю.[1], Стриковский А.В.[1], Шайхисламов И.Ф.[2], Руменских М.С[2].

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

2 – ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Представлены результаты исследования параметров плазмы в экспериментах по инжекции плазменных облаков, созданных малогабаритным импульсным коаксиальным генератором на полиэтилене [1,2], вдоль и поперек внешнего магнитного поля. Эксперименты проводились на стенде «Крот», позволяющем исследовать динамику плазменных облаков на масштабах порядка одного метра вдоль и поперек внешнего магнитного поля в режиме «безграничного» разлёта, имитирующего условия в космосе.

Типичные параметры углеродо-водородной плазмы облака, измеренные контактными диагностиками в предыдущих экспериментальных циклах работ (электрические и магнитные зонды), таковы: температура электронов $T_e \sim 1$ эВ, концентрация плазмы $n_e \sim 3\times10^{13}$ см$^{-3}$, начальная скорость V_0 от 10 до 30 км/с. Оцененная из разных соображений начальная энергия облака составляет величину порядка 0,1 Дж. За последний год была развита методика бесконтактных измерений плотности плазмы СВЧ-интерферометром, позволившая уточнить результаты предыдущих зондовых измерений. Также были проведены оптические измерения ионного состава плазмы облаков методами пассивной эмиссионной спектроскопии.

В лабораторном эксперименте по инжекции плазмы поперек внешнего магнитного поля облако имеет геометрию квазиплоского плазменного слоя. Это позволило просвечивать «плоский» слой плазмы в эксперименте с гомодинным интерферометром на частоте 37,5 ГГц для диагностики плотности плазмы, тем самым провести независимые бесконтактные измерения концентрации плазмы облака. Использование данной методики показало, что значение концентрации плазмы облака несколько выше, чем было получено ранее из контактных зондовых измерений ($n_e \geq 10^{14}$ см$^{-3}$). Методы пассивной эмиссионной спектроскопии, в свою очередь, позволили уточнить ионный состав облаков создаваемой плазмы. Измерения спектров проводились в диапазоне длин волн 4200-7200 нм; установлено, что плазма представлена ионами углерода невысокой зарядности (в основном, C^{1+}) и протонами (H^+). Отметим, что при лабораторном моделировании динамики плазменных облаков с использованием мощных лазеров, например, на установке КИ-1, плазма включает ионы углерода большей зарядности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИПФ РАН (проект № 0030-2021-0028).

1. С.В. Коробков, М.Е. Гущин, В.И. Гундорин, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.В. Стриковский, А.С. Николенко // Письма в ЖТФ 2019. Т.45. №5. С. 45.
2. М.Е. Гущин, С.В. Коробков, В.А. Терехин, А.В. Стриковский, В.И. Гундорин, И.Ю. Зудин, Н.А. Айдакина, А.С. Николенко // Письма в ЖЭТФ 2018. Т. 108. № 5-6. С. 416.

НОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЩНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМОЙ НА КРУПНОМАСШТАБНОМ СТЕНДЕ "КРОТ"

Гущин М.Е., Стриковский А.В., Зудин И.Ю., Коробков С.В., Николенко А.С., Лоскутов К.Н., Гундорин В.И., Палицин А.В., Громов А.В., Гойхман М.Б., Родин Ю.В.

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

Стенд «Крот» является одной из крупнейших плазменных установок России и мира, созданных для лабораторного моделирования физических явлений в космической плазме. Благодаря рекордным размерам вакуумной камеры и плазмы (объем ионизации может достигать нескольких десятков кубических метров), установка позволяет моделировать процессы распространения электромагнитного излучения и его взаимодействия с плазмой на протяженных – до 10 м – трассах. В 2020 – 2021 гг. на стенде «Крот» подготовлены и проведены эксперименты по взаимодействию мощного импульсного излучения с изотропной и замагниченной плазмой, моделирующие процессы в верхней атмосфере и ионосфере Земли.

В условиях, по параметрам подобия близких к реализуемым в нагревных экспериментах, проводятся исследования турбулентности замагниченной плазмы, развивающейся в поле высокочастотного импульса, подводимого к антенне. Измерения, выполненные зондами и методами просвечивания модифицированной области плазмы пробными волнами, позволили определить основные характеристики турбулентности, проявляющейся в возбуждении пульсаций плотности уровнем до нескольких процентов, а также продольных электрических токов. Турбулентность оказывает сильное влияние на распространение в плазме излучения накачки и пробных волн за счет эффектов модуляции (самомодуляции).

Для реализации режима взаимодействия волн с замагниченной плазмой, максимально приближенного к условиям нагревного ионосферного эксперимента, подготовлен модельный лабораторный эксперимент с накачкой в форме СВЧ волнового пучка. Разработаны и изготовлены узлы ввода пучка в камеру стенда «Крот», элементы линии транспортировки и фокусировки пучка. Предложены сценарии экспериментов для различных геометрий взаимодействия волнового пучка с неоднородной замагниченной плазмой.

Значительный интерес привлекают эффекты, которые могут возникать при распространении в атмосфере и ионосфере сверхширокополосных (СШП) электромагнитных импульсов (ЭМИ), в том числе – высокой интенсивности. Для моделирования линейных (дисперсионых) и нелинейных эффектов при прохождении ЭМИ через частично ионизированную среду на стенде «Крот» создана крупномасштабная («гигантская») коаксиальная линия с плазменным заполнением. Линия обеспечивает распространение импульсов наносекундной длительности в форме ТЕМ волны через частично ионизированную плазму на трассе длиной около 10 м. Проведены предварительные эксперименты, демонстрирующие возможности коаксиальной линии. Получены первые результаты по нестационарной ионизации различных газов в поле мощного субнаносекундного ЭМИ.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-12-00385.

ОСОБЕННОСТИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ, ВОЗБУЖДАЕМОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ НАКАЧКОЙ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

Зудин И.Ю., Гущин М.Е., Стриковский А.В., Коробков С.В., Петрова И.А., Катков А.Н., Кочедыков В.М.

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

Вопросы, связанные с развитием турбулентностей в плазме при воздействии на неё интенсивного электромагнитного излучения актуальны, в частности, для работ по УТС, и физике ионосферы и магнитосферы. Учёт турбулентности может быть важен при постановке натурных экспериментов, включающих в себя зондирование околоземной плазмы сигналами, возбуждаемыми мощными передатчиками, устанавливаемыми на борту космических аппаратов. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований плазменной турбулентности, возникающей под действием ВЧ накачки, в условиях, близких по параметрам подобия к активным ионосферным экспериментам.

Эксперименты были выполнены на крупномасштабном плазменном стенде «Крот». Воздействие на плазму осуществлялось с помощью рамочной антенны, вводимой непосредственно в плазму; к антенне подводился ВЧ радиоимпульс (накачка), частота которого попадала в диапазон свистовых волн. Контрольные эксперименты выполнялись с радиоимпульсами, частота которых лежала вне окна прозрачности плазмы. Особенностью выполненных экспериментов были коррелированные измерения возмущений концентрации и магнитного поля, выполненные зондами с СВЧ резонаторами и магнитными зондами. В ходе экспериментов осуществлялся прием из плазмы сигнала на частоте накачки, и выполнялось просвечивание возмущенной области плазмы пробными волнами.

Наблюдаемая турбулентность характеризуется возникновением глубокой модуляции накачки и пробных волн, возбуждением возмущений концентрации плазмы (величиной порядка нескольких процентов) и внешнего магнитного поля. Возмущения регистрируются внутри дакта плотности (формируемого за счёт нагрева плазмы в ближнем поле антенны накачки), в области плазмы, занятой полем накачки. Характерные частоты модуляции накачки и пробных волн, частоты возмущений концентрации и магнитного поля значительно ниже частоты нижнегибридного резонанса и ионной плазменной частоты. Проведенные измерения свидетельствуют о существовании корреляции между возмущениями магнитного поля и концентрации внутри одной магнитной силовой трубки. Корреляцию также демонстрируют возмущения концентрации, регистрируемые СВЧ зондами, разнесёнными в направлении поперёк внешнего магнитного поля. Радиус корреляции значительно превосходит гирорадиус электронов, но не превосходит гирорадиуса ионов. Турбулентность носит пороговый характер, причем её развитие начинается спустя некоторое время после включения накачки. Практически сразу после выключения накачки возмущения плазмы, а также модуляция пробной волны, исчезают. Установлено, что раскачка турбулентности происходит только в полосе прозрачности замагниченной плазмы для излучения на частоте накачки.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 21-12-00385.

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ КООРДИНИРОВАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО МОДИФИКАЦИИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ: НАГРЕВНОЙ СТЕНД СУРА И СПУТНИКИ SWARM

Лукьянова Р.Ю.[1], Фролов В.Л.[2,3], Рябов А.О.[2]

1) ИКИ РАН, Москва, *renata@aari.ru*
2)НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород
3) КФУ, Казань

Представлены новые результаты анализа экспериментальных данных, полученных в 2021 г. при измерении плазменных возмущений и электрических токов, которые индуцируются на ионосферных высотах при модификации F2-области среднеширотной ионосферы мощными КВ радиоволнами О-поляризации, излучаемыми нагревным стендом СУРА. В ходе координированных экспериментов измерения проводились с помощью бортовой аппаратуры спутников низкоорбитальной полярной группировки SWARM. В этот период все три космических аппарата (КА) находились в уникальной конфигурации, когда их орбиты лежали практически в одной плоскости. Расстояние между КА нижелетящего тандема SWARM-A и SWARM-C было сокращено до минимальных 20 км, что позволяло обоим КА наблюдать эффекты искусственной модификации ионосферы с малым разносом по пространству с временным сдвигом 4 с. На высотах ~450 км при развитии искусственных ионосферных неоднородностей в центральной части возмущенной магнитной силовой трубки, как правило, ближе к ее южному краю, регистрировались направленные вниз электрические токи. Втекающим в ионосферу токам соответствовал вынос электронов из области сильного разогрева плазмы вдоль линий геомагнитного поля во внешнюю ионосферу. Одновременно, на флангах возмущенной области (по спутниковым наблюдениям южнее и севернее области втекающих токов) наблюдались токи противоположного направления, отвечающие обратному движению электронов вдоль силовых линий геомагнитного поля.Возбуждение замкнутой в ионосфере системы токов соответствует картине, полученной в лабораторных плазменных установках при исследовании расплывания локально нагретой области магнитоактивной плазмы, и отвечает униполярному характеру термодиффузионного распространения плазменных возмущений сгенерацией вихревых токов. Продольные компоненты этих токов определяются движением электроноввдоль магнитного поля, а поперечные – движением ионов поперек него. При этом скорость процессов термодиффузии с униполярными коэффициентами во много раз превышает скорость переноса плазменных возмущений в амбиполярном приближении. Плазма выталкивается из области ее сильного разогрева вдоль силовых линий геомагнитного поля, формируя области с повышенной концентрацией. В ионосферных экспериментах это приводит к формированию дактов с избыточной плотностью плазмы на высотах внешней ионосферы. Соответствующий эффект наблюдается вышелетящим КА SWARM-B.

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

ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНДЕКС СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ДЛЯ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗА СРЕДНЕГО ЗА 81 ДЕНЬ ИНДЕКСА ЭТОЙ АКТИВНОСТИ

Деминов М.Г.

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

Во многих моделях параметров крайнего ультрафиолетового излучения Солнца, ионосферы и термосферы в качестве характеристики солнечной активности использованы индексы F_1 и F_{81} – величина потока солнечного излучения на длине волны 10.7 см в данный день и среднее за 81 день значение этого потока, центрированное на данный день. Использование индекса F_{81} в задачах краткосрочного прогноза перечисленных параметров по этим моделям затруднительно, поскольку для вычисления F_{81} необходим прогноз F_1 на 40 дней вперед.

Представлены результаты поиска индекса солнечной активности $F(T, N)$ для замены F_{81} в этих задачах, где $F(T, N)$ – кумулятивный (средневзвешенный с характерным временем T в сутках) индекс этой активности, вычисленный по данным F_1 за данный день и предыдущие N дней:

$$F(T,N) = \sum_{n=0}^{N} F_1(-n)\tau^n \; / \sum_{n=0}^{N} \tau^n \;,$$

где $\tau = \exp(-1/T)$, индекс $n = 0$ соответствует данному дню.

Этот поиск основан на определении оптимальных параметров T, N из условия минимума среднеквадратичного отклонения индекса $F(T, N)$ от F_{81} при относительно низких значениях N. Получено, что индекс $F(27, 81)$ с параметрами $T = 27$ и $N = 3T$ является искомым эффективным индексом солнечной активности для замены F_{81} в перечисленных задачах. Индекс $F(27, 81)$ применим при любом уровне солнечной активности и на любых фазах солнечных циклов. Например, среднеквадратичное отклонение отношения $F(27, 81)/F_{81}$ незначительно (примерно равно 5%) как для относительно высоких (1954–1996 гг.), так и низких (1996-2020 гг.) циклов солнечной активности. Среднее отклонение (сдвиг) индекса $F(27, 81)$ от F_{81} можно не учитывать во многих случаях. Например, в среднем для фаз роста или спада солнечных циклов в интервале 1954–1996 гг. этот сдвиг не превышает 2 (в единицах измерения F_1) по абсолютной величине.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 20-05-00050 и при поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 20-72-10023.

ВОЗДЕЙСТВИЕ СУББУРЕВЫХ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СИГНАЛЫ ГНСС ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ

Белаховский В.Б.[1], **Будников П.А.**[2], **Гомонов А.Д.**[1], **Пильгаев С.В.**[1]

[1] – *Полярный геофизический институт, г. Апатиты*
[2] – *Институт прикладной геофизики, г. Москва*

E-mail: belakhov@mail.ru

В работе исследована степень воздействия ионосферных возмущений на сигналы глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) во время суббуревых возмущений. Использованы данные ГНСС приемника Septentrio, установленного в городе Апатиты в конце 2020 года. ГНСС приемник Septentrio автоматически определяет фазовый и амплитудный индексы сцинтилляций, полное электронное содержание (ПЭС) ионосферы для различных спутниковых систем: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou. Для идентификации различных типов ионосферных возмущений использованы данные ЛЧМ ионозонда ПГИ, работающего в квазивертикальном режиме, данные оптических наблюдений полярных сияний в Апатитах и на станции Ловозеро, данные магнитометров на станциях Ловозеро, Лопарская. Рассматривается уровень роста фазовых и амплитудных сцинтилляций, вариации ПЭС ионосферы, вариации ROT на различных фазах суббури во время появления ярких полярных сияний. Оценивается степень влияния суббуревых ионосферных возмущений на уровень сцинтилляций сигналов различных спутниковых систем (GPS, ГЛОНАСС, Galileo).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10018, https://rscf.ru/project/18-77-10018/ (Белаховский В.Б.).

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОНЧ ДИАПАЗОНА В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ШИРОТ ВО ВРЕМЯ GLE69

Ахметов О.И., Мингалев И.В., Мингалев О.В., Белаховский В.Б., Суворова З.В., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Кириллов А.С.

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

ОНЧ волны (очень низкая частота: 3–30 кГц) могут генерироваться естественными источниками (например, грозовыми разрядами) и искусственными ОНЧ-передатчиками. ОНЧ-сигналы обычно отражаются от области D (60-90 км) ионосферы на верхней границе волновода Земля-ионосфера и от поверхности Земли на нижней. В таком волноводе Земля-ионосфера ОНЧ-волны могут распространяться на большие расстояния с малым затуханием. Однако в области высоких широт предположительно возможно спорадическое появление дополнительного высоко проводящего слоя на высотах, значительно меньших, чем высоты D-слоя ионосферы [1]. Изучение распространения ОНЧ-волн в таких необычных условиях является важной научной задачей, поскольку ОНЧ-волны используются для задач связи и навигации. В то же время ОНЧ-волны, распространяющиеся в волноводе Земля-ионосфера, являются одним из важных инструментов для ионосферы, поскольку ОНЧ-волны очень чувствительны к изменению электропроводности верхней границы волновода. Метод численного моделирования позволяет связать конкретные фазовые и амплитудные аномалии с конкретным видом профилей концентрации электронов в волноводе Земля-ионосфера. Что позволяет решать как прикладные задачи связи и навигации, так и исследовательские задачи диагностики состояния ионосферы по данным наземных станций регистрации ОНЧ сигналов.

В работе представлено исследование влияния одного из мощнейших событий GLE-69 (ground-level enhancement), произошедшего 20.01.2005, на распространение радиосигналов ОНЧ диапазона в высоких широтах методами вычислительного эксперимента на основе численной модели распространения электромагнитных волн, разработанной в Полярном геофизическом институте [2]. Данное событие выбрано по причине значительного влияния на проводимость в высокоширотном участке волновода Земля-ионосфера. С использованием модели RUSCOSMICS [3], созданной в ПГИ, рассчитывались профили ионизации атмосферы от 0 до 90 км во время GLE события для различных моментов времени (07, 08 UT). Затем из рассчитанных профилей ионизации определялся вклад GLE события в увеличение электронной концентрации. Используемая схема интегрирования уравнений Максвелла позволяет моделировать распространение широкополосных сигналов в замагниченой 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.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-77-10018), https://rscf.ru/project/18-77-10018/.

1. Remenets G.F. and Shishaev, V.A. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2019. 196. 105145. 10.1016/j.jastp.2019.105145.

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

3. Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Михалко Е.А., Гвоздевский Б.Б. // Солнечно-земная физика. 2019. Т. 5. № 3. С. 81. DOI: 10.12737/szf-53201908.

ВОЗМОЖНОСТИ МАКЕТА ГНСС ПРИЕМНИКА НА БАЗЕ МОДУЛЯ U-BLOX ZED-F9P ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ИЗМЕРЕНИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Когогин Д. А. [1], Соколов А.В. [1], Шиндин А. В. [2], Рябов А.В. [2], Насыров И.А. [1], Максимов Д.С. [1], Загретдинов Р. В. [1]

[1] *КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com*

[2] *ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия,*

В работе представлены возможности макета бюджетного мобильного ГНСС приемника на базе модуля u-blox ZED-F9P при решении задачи измерений полного электронного содержания ионосферы и исследовано влияние различных ГНСС антенн на характеристики регистрируемых с его помощью навигационных сигналов систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou. В качестве опорного и верифицированного источника информации о ГНСС данных выбрана станция KZN2 мировой сети ГНСС станций (IGS), оснащенная профессиональным геодезическим ГНСС приемником Trimble Alloy с антенной Trimble TRM 59800. Для сравнительного анализа влияния ГНСС антенн использованы два ГНСС приемника оригинальной разработки на базе модуля u-blox ZED-F9P, оснащенные бюджетной ГНСС антенной Beitian BT-290 и ГНСС антенной Trimble Zephyr 3 Rover. Дополнительно привлечены данные смартфона Xiaomi Mi 8, оснащенного двухчастотным ГНСС модулем. В сравнительном анализе использованы данные из набора, состоящего более чем из 20-ти навигационных спутников (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou), включающего в себя информацию о мощности принятого навигационного сигнала, и популярные индексы оценки ионосферной активности, полученные на основе данных о полном электронном содержании, а именно: а) – вариации относительного наклонного ПЭС; б) – производная ПЭС; в) – СКО производной ПЭС на 5 минутном интервале; г) – СКО относительного наклонного ПЭС в окне 100 с; д) СКО производной ПЭС, нормированной на квадрат наклонного фактора. ГНСС приемники u-blox и смартфон Xiaomi Mi 8 находились на расстоянии около 1 м друг от друга и в 150 м от станции KZN2.

Полученные результаты сравнительного анализа показывают, что для ГНСС приемников u-blox ZED-F9P регистрируемый уровень мощности навигационных сигналов не имеет характерной зависимости от класса используемой антенны на частотах L1 и L2, и в целом сопоставим с данными, полученными на IGS станции KZN2. В части регистрации относительного наклонного ПЭС и параметров, рассчитанных на его основе следует, что медианные уровни для рядов, полученных по данным измерений ГНСС приемника Trimble Alloy станции KZN2 на 20÷45% ниже, чем для приемников u-blox ZED-F9P. Использование ГНСС приемника на базе модуля u-blox ZED-F9P в качестве бюджетного решения для организации приемного, в том числе мобильного, пункта регистрации данных ПЭС, активно используемых в настоящий момент в ионосферных исследованиях, является целесообразным, особенно в зонах с низкой плотностью ГНСС-станций. В октябре 2021 года сеть, состоящая из пяти ГНСС приемников на базе модуля u-blox ZED-F9P прошла тестовые испытания в экспериментах на УНУ стенд СУРА.

Разработка программы регистрации ГНСС данных для приемника на базе модуля u-blox ZED-F9P, а также проведение эксперимента и обработка данных выполнены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 21-72-00043, https://rscf.ru/project/21-72-00043/. Анализ и интерпретация полученных данных, включая визуализацию результатов и подготовку доклада выполнены при финансовой поддержке гранта РНФ № 21-72-10131.

ВОЗМУЩЕНИЯ ОТ КРУПНЫХ ТРОПИЧЕСКИХ ЦИКЛОНОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫЕ В ОБЩЕМ СОДЕРЖАНИИ ОЗОНА

Сигачев П.К. [1,3], **Захаров В. И.** [1,2,3]

1МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия,sigachevpetr@gmail.com
2 Институт Физики Атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Москва, Россия
3 Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Процессы, происходящие в околоземном космическом пространстве и нижней атмосфере Земли, влияют на состояние верхней атмосферы. Различные геофизические явления в нижней атмосфере, такие как тайфуны и циклоны, землетрясения и др., происходят с выделением большого количества энергии, которую выносят из области возмущения внутренние и акустико-гравитационные волны (АГВ). Они не только оказывают влияние на колебания общего содержания озона (ОСО) и вертикального распределения озона (ВРО) на высотах стратосферы, но и передают возмущение выше, на высоты ионосферы.

Вариации ОСО выражаются в проникновении озона из нижних слоёв стратосферы в тропосферу. Так, исследование [1] над Тибетским плато показало, что в 2014г. произошло проникновение стратосферного озона в верхние слои тропосферы в результате вторжения области потенциальной завихренности. Отдельно были исследованы влияния ТЦ на озоновый слой в нижних слоях стратосферы [2]. Показано, что именно динамические механизмы воздействия циркуляционных систем ТЦ могут обуславливать наличие озоновых аномалий. В работе [3] озоновый слой использовался как маркер для АГВ от источников в тропосфере; отмечены колебания ОСО с периодами от 15 до 35 минут и показано, что вертикальные флуктуации ветра свыше 3м/с могут порождать флуктуации озона.

В нашей работе проводился анализ ОСО в области действия ТЦ с применением данных, полученных с прибора AIRS, входящего в комплекс приборов спутника Aqua [4]. Набор инструментов AIRS состоит из гиперспектрального прибора с 2378 инфракрасными каналами и 4 видимыми / ближними инфракрасными каналами. Анализ спутниковых данных позволил обнаружить наличие отрицательных аномалий в ОСО непосредственно над областью действия рассмотренных в работе ТЦ. Падение значений ОСО достигает до 40%, а области расположения отрицательных аномалий позволяют оценить область воздействия ТЦ на озоновый слой и проследить его трек. Полученные данные позволили пронаблюдать «растяжение» отрицательной аномалии вдоль фронтальной структуры, выходящей из ТЦ.

Проведенный нами анализ топологии пространственных аномалий ОСО как области промежуточного уровня распространения возмущений по данным [4] и ионосферных возмущений [5] позволил связать возмущения в озоновом слое с вариациями электронной концентрации. Эти явления можно рассматривать как результат воздействия акусто-гравитационных волн от ТЦ и действующих на высотах как озонового слоя, так и в ионосфере высотах, причем они совместно впервые зарегистрированы экспериментально.

Исследование выполнено частично за счет средств гранта РНФ (проект N 22-27-00182, СПК)

1. Chang S, Sheng Z et al. // Frontiers in Earth Science. 2020. V. **8**. P. 289. doi: 10.3389/feart.2020.00289
2. Нерушев А. Ф. Воздействие интенсивных атмосферных вихрей на озоновый слой земли., 2003. Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат. 223 с.
3. Hocke, Klemens &Kämpfer, N. &Flury, Thomas. (2009). Ozone as a tracer of short period gravity waves in the stratosphere and lower mesosphere. 2009. PhD. thesis.
4. https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni//
5. Zakharov V. I., Sigachev P.K. // Advances in Space Research. 2022. V. **69**. N 11. P.132-141. doi:10.1016/j.asr.2021.09.025

О ПАРАМЕТРАХ И ОЦЕНКЕ ИОНОСФЕРНОЙ ВОЗМУЩЁННОСТИ

Э. Г. Мирмович, к.ф.-м.н., доцент, mirmovich1940@mail.ru
ООО «Интеграл», г. Москва, Россия

При оценке возмущённости ионосферы для утилитарных задач, как правило, используется величина относительного отклонения критической частоты слоя F_2, иначе, величина плазменной частоты главного максимума ионосферы, измеряемой методом радиолокационной томографии, именуемым вертикальным зондированием ионосферы с внутренней стороны наземным или внешней стороны спутниковым ионозондами:

$$\delta f_0F_2 = (f_0F_{2t} - f_0F_{2m}) / f_0F_{2m}, \quad (1)$$

где индексы t и m означают текущее, возможно, возмущённое значение параметра и математическое ожидание, за которое в оценке степени возмущённости ионосферы применяется не мода или среднеарифметическое значение, а медиана. Впервые в такой символике параметр возмущённости ионосферы (ПВ) был введен в [1]. Этим же параметром оценивается и состояние отражающей области при распространении радиоволн, т.е. девиации максимально применимой и оптимально рабочей частоты (МПЧ и ОРЧ), и динамика самой электронной концентрации N_m для исследовательских задач.

$$\delta N_mF_2 = (N_mF_{2t} - N_mF_{2m}) / N_mF_{2m} = N_mF_{2t} / N_mF_{2m} - 1, \quad (2)$$

$$\delta МПЧ = МПЧ_t / МПЧ_m - 1. \quad (3)$$

ПВ для высоты главного максимума, который и сам требует прогнозирования, и как аргумент важен для прогноза вариаций интегрального содержания электронов, а также МПЧ:

$$\delta h_mF_2 = h_mF_{2t} / h_mF_{2m} - 1. \quad (4)$$

ПВ полутолщины слоя F_2:

$$\delta y_mF_2 = y_mF_{2t} / y_mF_{2m} - 1. \quad (5)$$

и полное электронное содержание Тес = $\int N(h)dh$

$$\delta Тес = Тес_t / Тес_m - 1 \quad (6)$$

Реальный ПВ для электронной концентрации Ne ~ f_0^2 даст большую величину, чем по (1)

$$\delta N_m \neq 2\delta f_0 = 2\delta f_0 + \delta f_0^2. \quad (7)$$

Считаем, что Тес ~ N_my_m,, тогда за его ПВ, который можно и моделировать, и прогнозировать, и сравнивать со спутниковыми данными, можно принять

$$\delta Тес \neq \delta N_m = \delta N_m + \delta y_m + \delta N_m\delta y_m \quad (8)$$

При наклонном распространении радиоволн МПЧ = $f_0F_2M(L)$, где L – условное расстояние для коэффициента М пересчёта вертикальной частоты на наклонную его ПВ –

$$\delta МПЧ \neq \delta f_0 = \delta f_0 + \delta M(L) + \delta f_0\, \delta M(L) \quad (9)$$

Этот ПВ был автором введен в прогностический пакет Дальневосточного центра гелиогеофизических прогнозов в 1978 г. как более точная рекомендация для радиосвязи [2].

Таким образом, оценивая состояние ионосферы параметрами возмущённости по (2–9), включая их в систему прогнозирования космической погоды, мы получаем наиболее объективные оценки для практических и научно-исследовательских задач,

Однако пока в официальном формате есть методы прогнозирования ионосферной возмущённости только для δf_0F_2 [3, 4].

1. Мирмович, Э. Г. К использованию параметра δfoF2 при оценке ионосферной возмущённости // ИГАФС. М.: Наука, вып. 27. 1973. С. 37–41.
2. Мирмович Э.Г. Исследование и прогноз термосферно-ионосферных возмущений / Автореф. дисс… канд. физ.-мат. наук. Иркутск. 1981. 23 с.
3. Зевакинam, Р А., Лаврова, Е. В. Ионосферные возмущения и методы их прогноза. М., 1977, 171 с.
4. Медникова, Н. В. Вариации ионосферы во время магнитосферных возмущений. М., 1980, 150 с.

ФОРМИРОВАНИЕ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ВЧ НАГРЕВЕ ИОНОСФЕРЫ: ЗАВИСИМОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ ВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ

Демехов А.Г.

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

С помощью численных расчетов в рамках модифицированной модели SAMI2 исследуется зависимость характеристик крупномасштабных возмущений плазмы при ВЧ нагреве ионосферы от частоты и мощности ВЧ излучения. Показано, что учет перестройки профиля концентрации плазмы в F области, обусловленный нагревом, приводит к сильной зависимости возмущений плотности плазмы от этих параметров. Проанализировано влияние омического поглощения в нижней ионосфере на образование крупномасштабных неоднородностей.

Величина возмущений плотности сильно зависит как от мощности, так и от частоты воздействия, причём эти зависимости сильно нелинейны. Один из основных механизмов нелинейности — изменение параметров аномального поглощения вследствие перераспределения плазмы в зоне нагрева. За счёт этого более мощный нагрев приводит к более быстрому подавлению аномального поглощения и соответственно к замедлению вытеснения плазмы из области нагрева, которое в дальнейшем продолжается со средним темпом, достаточным для поддержания баланса между вытеснением плазмы и фоновой ионизацией при концентрации, соответствующей верхнегибридному резонансу. Таким образом, рост возмущений концентрации быстро насыщается с увеличением мощности ВЧ излучения, если частота излучения близка к критической частоте f_{oF2}.

С указанным выше фактором связано возрастание возмущений концентрации при уменьшении частоты ВЧ излучения, т.е. при понижении области ВГ резонанса по отношению к максимуму F области. В этом случае вынос возмущений в верхнюю ионосферу и магнитосферу может продолжаться намного дольше: при рассмотренных выше параметрах нагрева (мощностях и частотах ВЧ волн) он длился вплоть до выноса всей плазмы с концентрацией выше уровня ВГ резонанса. При этом максимальное увеличение концентрации относительно невозмущённого уровня достигало 500% в расчётах для стенда HAARP при длительности нагрева около 2 часов и максимальной мощности ВЧ излучения стенда (3,2 МВт). На высоте 860 км, примерно соответствующей орбите некоторых низкоорбитальных спутников (DEMETER, NOAA/POES), относительное увеличение концентрации при тех же условиях составляло около 250% при ВЧ мощности как 1 МВт, так и 3,2 МВт.

Таким образом, при планировании экспериментов по изучению крупномасштабных неоднородностей плазмы, образуемых в результате ВЧ нагрева ионосферы, и при интерпретации уже имеющихся экспериментальных данных следует обращать особое внимание на соотношение между частотой ВЧ излучения и критической частотой ионосферы. Согласно результатам проведенных расчетов, более выгодным режимом в смысле увеличения возмущений концентрации является длительный нагрев на частотах около 70% от критической частоты ионосферы, для которых условие верхнегибридного резонанса выполняется заметно ниже максимума F области.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21–12–00385.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ МЕТАСТАБИЛЬНОГО He В АТМОСФЕРЕ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА WASP-80b

Ефимов М.А., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, efim.sci@gmail.com

Метастабильный триплет HeI в ближнем инфракрасном диапазоне (10830 Å) важен для изучения верхних атмосфер планет [1]. Из-за близкого расстояния до активной звезды K-типа горячий Юпитер WASP-80b был идентифицирован как возможная перспективная цель для обнаружения и измерения поглощения HeI в верхних слоях атмосферы. Однако наблюдения наземным телескопом [2] не обнаружило каких-либо признаков транзитного поглощения в положении триплета HeI, с верхним пределом области поглощения 1.11 в единицах планетарного радиуса.

Для понимания результатов наблюдений в данной работе, мы использовали трехмерную многожидкостную гидродинамическую модель [3,4], которая успешно воспроизводила наблюдения в линии HeI для ряда планет. Учитывая низкую скорость фотоионизации метастабильного HeI, единственными параметрами, влияющими на поглощение, наблюдаемое во время транзитных наблюдений, являются звездный XUV-поток, содержание He и, возможно, сила звездного ветра. Мы выяснили, что поглощение существенно меняется при изменении как потока XUV, так и содержания гелия в атмосфере. В частности, мы изменили поток XUV в два раза, однако, поглощение в линиях метастабильного HeI продолжало наблюдаться. Отметим, что при моделировании учитывалось вращение планеты, которое, как предполагается, приливно синхронизировано с орбитой планеты вокруг родительской звезды. Поэтому мы понижали содержание He в атмосфере до тех пор, пока не сопоставили данные наблюдений, и в результате было получено, что для оцененного звездного потока XUV, глубина поглощения падает ниже 0,7% для значения He / H менее $5 \cdot 10^{-3}$, что примерно в 16 раз меньше солнечного. Таким образом, это сильно ограничивает содержание гелия в верхних слоях атмосферы планеты. Чтобы подкрепить этот результат, мы вычислили дополнительную модель, увеличивающую звездный УФ-поток, то есть скорость метастабильной фотоионизации He, в 100 раз, но и в этом случае мы получили значительное поглощение в линиях метастабильного HeI, что не соотносится с данными наблюдений.

Настоящая работа выполнена в рамках проекта Минобрнауки России № 075-15-2020-780, также поддержана грантами РНФ № 18-12-00080, РФФИ 20-02-00520.

1. Lammer, H., Leitzinger, M., Scherf, M., et al. 2020, Icarus, V. **339**, 113551
2. Fossati et al. (2021) arXiv preprint arXiv:2112.11179.
3. Shaikhislamov, I. F., Fossati, L., Khodachenko, M. L., et al. 2020, A&A, V. **639**, A109
4. Shaikhislamov, I. F., Khodachenko, M. L., Lammer, H., et al. 2021, MNRAS, V. **500**, 1404

ПОГЛОЩЕНИЕ В ЛИНИИ Hα АТМОСФЕРОЙ ГОРЯЧЕГО ЮПИТЕРА KELT-20b

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

ИЛФ СО РАН, НГТУ

mib383@gmail.com

В работе моделировалось поглощение в линии Hα обусловленное резонансным рассеянием Lyα фотонов в атмосфере горячего Юпитера Kelt-20b. Перенос Lyα фотонов вычислялся методом Монте Карло. Задача решалась в приближении изотропного частично когерентного рассеяния. Атмосфера предполагалась сферически симметричной с заданными профилями температуры и объемной плотности атомов водорода. Профили объемной плотности возбужденных атомов водорода получены с использованием трехмерного газодинамического моделирования [1] при различных значениях параметра XUV.

Работа поддержана грантом РНФ 21-72-00129, также РНФ №18-12-00080, Минобрнауки России № 075-15-2020-780 и проектом РФФИ 20-02-00520. Часть работы выполнена в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых МК-1089.2021.1.2.

1. Shaikhislamov I. F. et al. //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 2019.
2. Odert P. et al. Modeling the Lyα //arXiv preprint 2019. arXiv:1903.10772.

ГЕНЕРАЦИЯ ХОЛЛОВСКИХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ПРИ РАЗЛЕТЕ КВАЗИ-СФЕРИЧЕСКОГО ОБЛАКА ПЛАЗМЫ В РЕЖИМЕ СЛАБО ЗАМАГНИЧЕННЫХ ИОНОВ

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

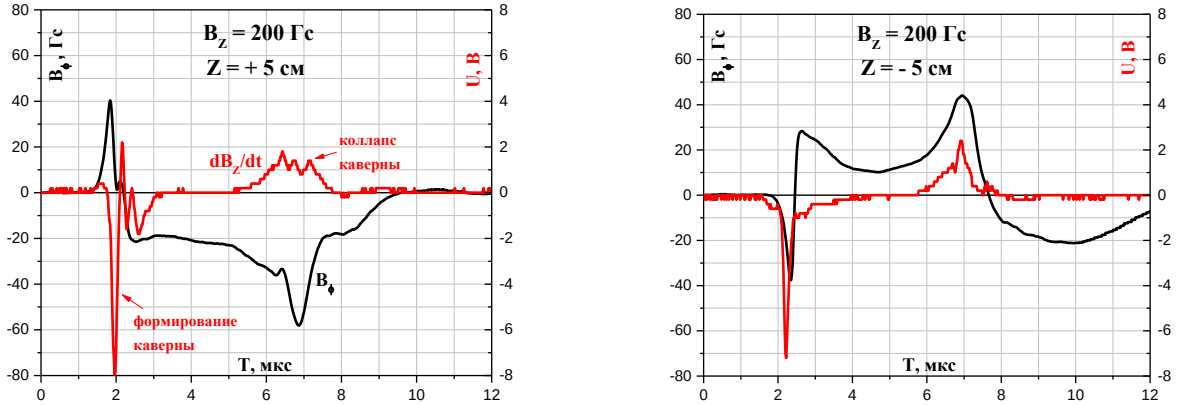
ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, chibranov2013@yandex.ru

На установке КИ-1 были получены данные, показывающие ламинарный и аномально быстрый внос магнитного поля в плазму на стадии, когда облако лазерной плазмы продолжает расширение поперек магнитного поля. На основе этих данных была впервые предложена гипотеза о генерации в расширяющемся сферическом облаке плазмы азимутальных B_φ полей за счет Холловского члена, и переноса магнитного поля соответствующими Холловскими токами, которые перпендикулярны по направлению токам, формирующим магнитную каверну.

Основным требованием к эксперименту по исследованию Холловских B_φ полей является квази-симметричность облака плазмы, что до сих пор не было реализовано в предыдущих экспериментах. Схема получения лазерных облаков четырех-лучевым облучением, реализованная на стенде КИ-1 в 2021 г., впервые открыла такую возможность.

Предполагалось, что азимутальное поле должно быть направленно в противоположные стороны относительно экваториальной плоскости XY (при внешнем поле, направленном вдоль Z). Поэтому магнитные зонды были расположены попарно симметрично относительно экваториальной плоскости.

Экспериментальные данные демонстрируют формирование и коллапс магнитной каверны при разлете облака. Измеренная азимутальная компонента поля имеет различное направление относительно экваториальной плоскости. Ее динамика также состоит из двух фаз, коррелированных с фронтом формирования и коллапса каверны.



Сигналы магнитных зондов. Красные кривые – производная возмущения основной компоненты, которая показывает формирование каверны (передний фронт) и коллапса каверны (задний фронт). Черные кривые показывают величину азимутальной компоненты. Измерения сделаны при положительных и отрицательных координатах Z относительно экваториальной плоскости при одном поперечном расстоянии от мишени X = 5 см.

Таким образом, полученные данные впервые продемонстрировали факт генерации Холловского магнитного поля при расширении облака плазмы в режиме слабо замагниченных ионов. Это поле генерируется на фазе схлопывания каверны и имеет величину, достаточную для объяснения этого процесса. Можно предположить, что Холловские эффекты также могут играть существенную роль в физике формирования и распространения джетов.

Настоящая работа была выполнена в рамках программы №5-5 НЦФМ (ВНИИЭФ) при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (тема № АААА-А17-117021750017-0) и проекта РФФИ № 18-2921018.

ВОЗМУЩЕНИЯ ИОНОСФЕРЫ ПОСЛЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РАЙОНЕ БРАЗИЛЬСКОЙ АНОМАЛИИ

Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П.

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

Рассмотрено воздействие акустических волн землетрясений Сандвической плиты на ионосферу. Сандвическая плита (56-60 S, 25-28 W) раположена в плоскости Бразильской аномалии, где энергичные частицы радиационного пояса наиболее глубоко проникают в атмосферу Земли, что приводит к ряду особенностей. Аппаратурой спутника Космос-1809 регистрировались солитонные структуры электромагнитных излучений в КНЧ-ОНЧ диапазонах с центром L~2.9, периодические структуры в электрическом поле [1,2].

Другой важной характеристикой землетрясений Сандвической плиты является то, что они безфоршоковые, магнитудой M = (5 – 6) на глубине ~ 33 км. Землетрясения этой плиты происходили при развитии всех тропических циклонов (ТЦ), рассмотренных в работах авторов [1-3]. Передачу воздействия можно объяснить законом сохранения углового момента. Для вращающейся замкнутой системы из взаимодействующих литосферных плит изменение углового момента из-за поднятия плиты в области ТЦ должно компенсироваться соответствующим движением других плит. Одно из таких «слабых» мест – маленькая Сандвическая плита.

1. Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. // Геомагнетизм и аэрономия. 2015. Т. **55.** С. 258.

2. Kostin V., Belyaev G., Ovcharenko O., Trushkina E. // Intern. J. Engineering Research & Science. 2020. V. **6.** P. 25.

3. Костин В.М., Беляев Г.Г., Овчаренко О.Я., Трушкина Е.П. // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2022. Т. **19.** В редакции.

КИНЕТИКА СИНГЛЕТНОГО КИСЛОРОДА В ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЕ, НА ВЫСОТАХ СВЕЧЕНИЯ НОЧНОГО НЕБА И В СПРАЙТАХ

Кириллов А.С.

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

Проведен расчет коэффициентов гашения синглетных электронно-возбужденных молекул $O_2(b,v\geq0)$ молекулами кислорода и молекулами азота. Показано, что доминирующими каналами гашения синглетного кислорода молекулами кислорода являются межмолекулярные процессы переноса электронного возбуждения с образованием $O_2(b,v=0)$ и $O_2(a,v=0)$. При столкновении с молекулами азота основным механизмом гашения является внутримолекулярный переход с колебательным возбуждением N_2. Полученные коэффициенты используется при расчете относительных населенностей $O_2(b,v\geq0)$ на высотах полярной ионосферы, свечения ночного неба и спрайтов.

Исследованы механизмы образования электронно-возбужденного $O_2(b,v)$ и свечения Атмосферных полос молекулярного кислорода в нижней полярной ионосфере. Показано, что определяющий вклад в свечение полос 762 и 771 нм вносят процессы прямого возбуждения авроральными электронами и перенос энергии электронного возбуждения с метастабильного атомарного кислорода $O(^1D)$.

Проведен расчет колебательных населенностей $O_2(b,v)$ на высотах свечения ночного неба 80-110 км. Сравнение рассчитанных интенсивностей свечения Атмосферных полос O_2 с результатами имеющихся в научной литературе экспериментальных оценок дало удовлетворительное согласие. Показано, что зависимость свечения Атмосферных полос O_2 от колебательного уровня в первую очередь определяется кинетическими особенностями взаимодействия синглетного электронно-возбужденного кислорода с молекулами кислорода.

Впервые проведены расчеты концентраций $O_2(b,v)$ на высотах 70 и 50 км средней атмосферы Земли при импульсном разряде продолжительностью порядка $\tau\approx5$ мкс и учетом процессов внутримолекулярных и межмолекулярных переносов энергии возбуждения при неупругих столкновениях. При этом исследованы как вклад процесса прямого возбуждения синглетного состояния b электронами разряда, так и вклады с триплетных состояний молекулярного азота при молекулярных столкновениях и процессах переноса энергии возбуждения между сталкивающимися молекулами. Расчеты наглядно показали, что при исследовании кинетики метастабильного молекулярного кислорода $O_2(b)$ на высотах свечения спрайтов необходимо учитывать как прямое возбуждение электронами разряда, так и молекулярные столкновительные процессы, при которых происходит перенос энергии возбуждения с триплетных состояний N_2.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ВОЗБУЖДЕННОГО МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА НА ОБРАЗОВАНИЕ РАДИКАЛОВ В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ТИТАНА

Кириллов А.С.

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

Высыпания высокоэнергичных частиц в атмосферу Титана вызывают процессы диссоциации и ионизации газов N_2 и CH_4, которые приводят к образованию атомов H, C, N и некоторых радикалов, необходимые для синтеза сложных органических молекул. В химических процессах с участием различных атомов и радикалов образуется множество тяжелых газообразных молекул. Молекулы могут превращаться в органические аэрозоли в реакциях объединения. Известен тот факт, что фотолиз и диссоциация CH_4 связана с образованием радикалов CH_3, CH_2, CH, являющимися предшественниками всех других углеводородов, наблюдаемых в атмосфере Титана.

В настоящей работе впервые рассмотрена электронная кинетика триплетных $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$ и синглетных состояний $a'^1\Sigma_u^-$, $a^1\Pi_g$, $w^1\Delta_u$ N_2 в нижней и средней атмосфере Титана во время высыпания космических лучей. В расчетах учитываются внутримолекулярные и межмолекулярные переносы энергии при неупругих столкновениях электронно-возбужденного молекулярного азота с молекулами N_2, CH_4, CO и C_2H_2. Изучено влияние электронно-возбужденных молекул N_2 на образование радикалов CH_3, C_2H, C_2H_3 в нижней и средней атмосфере Титана на расстоянии 50-400 км.

Основные результаты этих расчетов следующие:

Расчеты показывают влияние увеличения плотности атмосферы на рассчитанные вклады электронно-возбужденных молекул N_2 в образование радикала CH_3. Увеличение концентрации N_2 приводит к увеличению вкладов процессов переноса возбуждения с электронно-возбужденных молекул N_2 на молекулы метана по сравнению с вкладом процесса прямой диссоциации CH_4. Вклады триплетных и синглетных состояний N_2 превышают вклад процесса прямой диссоциации в максимуме образования ионов на высоте h~75 км в 14 и 6 раз, соответственно.

Впервые показано доминирование вклада реакций метастабильного молекулярного азота с молекулами C_2H_2, C_2H_4 в образование радикалов C_2H и C_2H_3. Из результатов расчетов видно, что вклады данных процессов переноса электронного возбуждения в образование радикалов C_2H и C_2H_3 на несколько порядков превышают вклады других процессов во всем диапазоне высот. Следовательно, упомянутые межмолекулярные процессы обязательно должны быть приняты во внимание при изучении химической кинетики в нижней и средней атмосфере Титана.

Автор признателен правительству Российской Федерации и Министерству высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

ЭЛЕКТРОННАЯ И КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ КИНЕТИКА МОЛЕКУЛЯРНОГО АЗОТА В СРЕДНЕЙ АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В СОБЫТИЯХ GLE

Кириллов А.С., Белаховский В.Б., Маурчев Е.А., Балабин Ю.В., Германенко А.В., Гвоздевский Б.Б.

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

Солнечные протоны, проникающие в атмосферу Земли, характеризуются как мягкими энергетическими спектрами (энергии порядка нескольких десятков и сотен МэВ), так и релятивистскими энергиями. Релятивистские высокоэнергичные протоны обнаруживаются наземными нейтронными мониторами, размещенными в полярных областях, как Ground Level Enhancements события (события GLE). Использование данных сети нейтронных мониторов позволяет определять спектры высокоэнергетических протонов, высыпающихся в атмосферу Земли. Высыпания высокоэнергичных частиц вызывает увеличение нечетного азота NO_x и нечетного водорода HO_x на высотах высокоширотной атмосферы за счет каскада процессов диссоциации, ионизации и рекомбинации. Это в свою очередь может привести к тому, что во время солнечных протонных событий высыпания высокоэнергичных частиц в атмосферу инициируют процессы, приводящие к уменьшению концентраций озона в средней атмосфере Земли.

Рассмотрены механизмы образования электронно-возбужденных и колебательно-возбужденных молекул молекулярного азота на высотах средней атмосферы при высыпании высокоэнергетических протонов. Расчеты выполнены для событий GLE65 (28.10.2003), GLE67 (02.11.2003), GLE69 (20.01.2005). Основные результаты этих расчетов следующие.

Показано, что высотные профили объемных интенсивностей излучения полос 1PG системы 669 нм и 749 нм (спонтанный излучательный переход $B^3\Pi_g,v'\rightarrow A^3\Sigma_u^+,v''$) показывают значительное уменьшение по сравнению с интенсивностью излучения полосы 2PG системы 337 нм (спонтанный излучательный переход $C^3\Pi_u,v'\rightarrow B^3\Pi_g,v''$) на высотах средней атмосферы Земли. Уменьшение можно объяснить высокими скоростями тушением состояния $B^3\Pi_g$ при молекулярных столкновениях с молекулами N_2 и O_2 по сравнению со скоростями тушения состояния $C^3\Pi_u$.

Исследование колебательных населенностей основного состояния $X^1\Sigma_g^+,v>0$ во время события GLE69 на высотах средней атмосферы показало различные основные механизмы в возбуждении молекулярного азота. Во-первых, возбуждение вторичными электронами является принципиальным для всех колебательных уровней. Во-вторых, получается, что процесс внутримолекулярного переноса энергии с метастабильного состояния $A^3\Sigma_u^+$ при столкновениях $N_2(A^3\Sigma_u^+,v'=0\text{-}5)+N_2$ доминирует в колебательном возбуждении высоких колебательных уровней $v=20\text{-}30$ основного состояния $X^1\Sigma_g^+$ молекулярного азота. Колебательно-возбужденные молекулы азота могут играть очень важную роль в колебательном возбуждении парниковых газов и в балансе инфракрасного излучения средней атмосферы Земли во время возмущений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-77-10018, https://rscf.ru/project/18-77-10018/

ВОЗМУЩЕНИЕ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ ИОНИЗИРУЮЩИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК

Сорокин В.М., Ященко А.К., Мушкарев Г.Ю.

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

Интенсивные исследования геомагнитных эффектов солнечных вспышек (geomagnetic solar flare effect Sfe) были проведены в течение Международного Геофизического Года (МГГ). Установлено, что кратковременные всплески вариаций геомагнитного поля на солнечной полусфере возникают в результате увеличения концентрации электронов и ионов в нижней ионосфере под действием ионизирующего излучения солнечных вспышек. Это подтверждается по совокупности всесторонних данных, связанных с явлениями, наблюдаемыми в течение МГГ. Было сделано заключение, что основной процесс, приводящий к наблюдаемым явлениям, заключается в следующем:

-ионизирующее излучение солнечных вспышек производит дополнительную концентрацию электронов и ионов;

-увеличение концентрации электронов и ионов приводит к увеличению проводимости ионосферы и возмущению ионосферного электрического тока, который производит соответствующие геомагнитные эффекты солнечных вспышек;

-дополнительное поглощение УКВ радиоволн ионосферой связано с внезапным ионосферным возмущением.

Многочисленные работы по геомагнитным эффектам солнечных вспышек, проводимые совместно с одновременными наблюдениями процессов, сопровождающих вспышки, направлены на поиск механизмов их генерации. Среди геомагнитных возмущений выделены пульсации с периодами ≥ 400 с, и с периодами ≤ 200 с. Считается, что первый тип пульсаций связан с внезапным расширением магнитосферы в результате уменьшения плотности плазмы в солнечном ветре и колебаниями магнитопаузы, а второй тип пульсаций связан с магнитосферными резонансами. В работе рассмотрен механизм генерации первого типа пульсаций, который связан с поглощением в ионосфере ионизирующего излучения солнечных вспышек до момента воздействия солнечного ветра на магнитосферу. Получена модель формирования акустико-гравитационной волной колебаний геомагнитного поля с периодами (1 – 10) минут, которые наблюдаются во время воздействия на ионосферу ионизирующего излучения солнечных вспышек. Проведен анализ магнитограмм на различных расстояниях от подсолнечной точки на поверхности Земли, на которых наблюдается колебательный режим возмущения геомагнитного поля. Проведен расчет концентрации электронов и проводимости в нижней ионосфере, а также характеристик источника тепла и силы Ампера, возникающих в результате изменения ионосферного электрического тока. Рассмотрена генерация импульса акустико-гравитационных волн этими источниками в нижней ионосфере. Распространение этих волн в проводящей ионосфере сопровождается возмущением электрического тока и магнитного поля. Проведен расчет временной зависимости магнитного поля, результаты которого сопоставлены с магнитограммами. Показано, что данная модель может быть использована для интерпретации данных регистрации колебаний геомагнитного поля в диапазоне (1 – 10) мин.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 01201356396 и при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая в рамках научного проекта № 21-55-53053.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ВНУТРЕННИХ ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН МЕТОДОМ ДОПЛЕРОВСКОГО СДВИГА ЧАСТОТЫ

Белашов В.Ю., **Харшиладзе О.А.**

КФУ, г. Казань, Россия, vybelashov@yahoo.com

Представлено аналитическое решение прямой и обратной задач, возникающих при исследовании динамики внутренних гравитационных волн (ВГВ) [1] методом регистрации доплеровского сдвига частоты (ДСЧ). Прямая задача состоит в определении реакции доплеровского сдвига на ВГВ в области точки отражения радиоволны; обратная задача – определение параметров ВГВ по данным доплеровского сдвига частоты [2]. Решения получены в приближении изотермической ионосферы для высот F-области. Они представлены в виде, удобном для их практического использования и могут иметь широкую область применения, включая задачи детектирования солитоноподобных волновых структур в F-области ионосферы как при наземных исследованиях, так и при зондировании с космических аппаратов [3]. Полученное представление взаимосвязи ДСЧ и вертикальной компоненты скорости нейтральных частиц удобно тем, что при решении прямой задачи для вычисления доплеровского сдвига нет необходимости предварительно восстанавливать профиль электронной концентрации по полю скорости возмущения. При решении же обратной задачи мы можем сразу восстановить поле скорости нейтральной компоненты по записям доплеровского смещения – непосредственно из доплерограммы. Представленный частный пример наглядно иллюстрирует практическую значимость полученных результатов в исследованиях ВГВ методом ДСЧ.

Полученные результаты, в частности, актуальны при решении задач детектирования в F-области солитоноподобных волновых «предвестников», генерируемых в областях резких градиентов основных ионосферных параметров при движении пятна солнечного затмения и солнечного терминатора [4, 5] и наблюдаемых в многочисленных экспериментах по зондированию ионосферы [6–9]. Результаты также могут оказаться полезными при решении задач, связанных с импульсным воздействием на ионосферу таких источников, как сейсмические события [10] и наземные искусственные взрывы [11].

Настоящая 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. Работа была поддержана Национальным научным фондом Грузии им. Шота Руставели (SRNF) (грант № FR17 252).

1. Белашов В.Ю. // Геомагн. и аэроном. 1990. Т. **30**. № 4. С. 637.
2. Савельев В.Л. // Волновые возмущения в ионосфере. Алма-Ата: Наука, 1987. С. 60.
3. Белашов В.Ю. // Геомагн. и аэроном. 2018. Т. **58**. № 5. С. 676.
4. Belashova E.S., Belashov V.Yu., Vladimirov S.V. // J. Geophys. Res. 2007. V. **112**. A07302.
5. Belashov V.Yu., Belashova E.S. // Adv. Space Res. 2015. V. **56**. P. 333.
6. Belashov V.Yu., Poddelsky I.N. // Proc. 1992 Int. Symp. on EMC, Beijing, China. P. 145.
7. Galushko V.G., Kashcheyev A.S., Kashcheyev S.B., et al. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2007. V. **69**. P. 403.
8. Nasyrov I.A., Kogogin D.A., Shindin A.V., et al. // Adv. Space Res. 2016. V. **57**. P. 1015.
9. Насыров И.А., Когогин Д.А., Шиндин А.В., et al. // XII ежегод. конф. «Физика плазмы в Солнечной системе», 6−10 февраля 2017. М.: ИКИ РАН. С. 30.
10. Перцев Н.Н., Шалимов С.Л. // Геомагнетизм и аэрономия. 1996. Т. **36**. № 2. С. 111.
11. Drobzheva Ya.V., Krasnov V.M. // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2003. V. **65**. N 3. P. 369.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНОГО АНАЛИЗА СНИМКОВ НОЧНОГО НЕБА И ДВУМЕРНЫХ КАРТ ВАРИАЦИЙ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ В ПЕРИОД РЕГИСТРАЦИИ ПОДАВЛЕНИЯ ФОНОВОГО СВЕЧЕНИЯ В ЛИНИИ 630 НМ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА СТЕНДЕ СУРА В АВГУСТЕ-СЕНТЯБРЕ 2021 ГОДА

Когогин Д. А.[1], Максимов Д. С.[1], Насыров И. А.[1], Шиндин А. В.[2], Грач С. М.[2], Емельянов В. В.[1], Белецкий А. Б.[3], Загретдинов Р. В.[1]

[1] КФУ, г. Казань, Россия, denis.kogogin@gmail.com

[2] ННГУ, г. Нижний Новгород, Россия

[3] ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

В августе и сентябре 2021 года на Уникальной научной установке «Многофункциональный комплекс для исследования околоземного и космического пространства (Стенд СУРА, рег. № 06-30)» (далее УНУ Стенд СУРА) прошли первые полноценные экспериментальные измерения по исследованию искусственного оптического свечения после проведенных в 2020-2021 гг. работ по ремонту и модернизации УНУ Стенд СУРА в рамках гранта Министерства образования и науки РФ. Суммарно было проведено более десяти включений УНУ Стенд СУРА длительностью от получаса до трех часов. В шести из них наблюдались оптические эффекты, такие как, усиление яркости свечения и подавление фонового свечения в «красной» (630 нм) линии атомарного кислорода. Так как ранее на УНУ стенд СУРА ПЗС-камерами не регистрировалось подавление фонового свечения, было решено, в первую очередь, провести анализ именно этих сеансов. Всего подавление фонового свечения наблюдалось в трех экспериментальных днях: 10.08.2021; 11.08.2021; 03.09.2021. Наиболее длительный интервал регистрации данного оптического эффекта был 10.08.2021. Именно этот день и был выбран для дальнейшего анализа. Воздействие на ионосферу 10.08.2021 осуществлялось в интервале 21:31-23:25 МСК на частоте 4.3 МГц при вертикальной ориентации диаграммы направленности (ДН) УНУ Стенд СУРА. Режим работы передатчиков: непрерывный интервал излучения волны накачки 2.5 мин, пауза 3.5 мин. Мощность каждого из трех передатчиков составляла 170, 160, 150 МВт, соответственно на момент времени 21:30 МСК.

Для анализа были построены двумерные карты вертикально ПЭС по данным полученным на сети ГНСС станций в окрестности УНУ Стенд СУРА и использованы данные регистрации снимков ночного неба в «красной» (630 нм) линии атомарного кислорода, полученные ПЗС камерами SBIG STF-8300M (установлена в непосредственной близости от ДН УНУ Стенд СУРА) и оптической системы KEO Sentinel (в 170 км к востоку). Для расчета медианной интенсивности вариаций ПЭС была взята область, ограниченная полуразмером ДН стенда. Для расчета медианной интенсивности свечения на снимках с обоих камер использовалась область 40×40 пикселей. Центр всех областей определялся центром ДН стенда. По результатам проведенного анализа обнаружено уменьшение фонового свечения, достигающее 100÷130 отн. ед. АЦП для ПЗС камеры KEO Sentinel, коррелирующее с интервалами непрерывного излучения волны накачки. В ряде сеансов наблюдается антикорреляция между данными ПЭС и интенсивности свечения. Полученные результаты являются предварительными и требует дальнейшего детального анализа и изучения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-00043, https://rscf.ru/project/21-72-00043/. Эксперименты на УНУ стенд СУРА проведены при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 20-12-00197. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» (ИСЗФ СО РАН).

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ВСПЫШЕК ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ, НАБЛЮДАВШИХСЯ НА НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКАХ

Сурков В.В.[1,2]

[1]*ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия, surkovvadim@yandex.ru*

[2]*ИФЗ РАН, г. Москва, Россия*

В последние два десятилетия большое внимание уделялось исследованию атмосферных вспышек гамма излучения, так называемым TGFs (terrestrial gamma-ray flashes), которые иногда наблюдались на низкоорбитальных спутниках над активными грозовыми образованиями [1]. Объяснение физических механизмов генерации TGFs и идентификация местоположения в атмосфере источника вспышек гамма излучения – пока ещё не до конца решённые проблемы. Из-за сложности основных электродинамических и транспортных уравнений, описывающих TGF, для моделирования этого явления обычно используются численные методы, такие как метод Монте Карло [2].

В данной работе, в отличие от предыдущих численных моделирований, используются аналитические решения, полученные в рамках простой модели точечного источника гамма излучения, находящегося в вертикально неоднородной атмосфере. В модели предполагается, что распределение гамма-квантов по энергии определяется спектром тормозного излучения, вызванного лавиной релятивистских убегающих электронов в сильном электрическом поле. Предполагается также, что поглощение энергии квантов с энергиями в диапазоне от 25 кэВ до 20 МэВ в атмосфере вызвано фотоэлектрическим эффектом, комптоновским рассеянием и образованием электрон-позитронных пар, но при этом не учитываются изменения траекторий гамма квантов, вызванных их столкновениями. Средняя длина λ свободного пробега квантов в атмосфере задаётся в виде функции их энергий и высоты, на которой они образуются.

В работе показано, что пространственно-временное распределение плотности потока и флюенса гамма-квантов на орбите спутника очень сильно зависит от высоты источника TGF из-за экспоненциальной зависимости λ от высоты. Эта тенденция особенно заметна для небольших высот, сравнимых с вертикальным масштабом изменения плотности атмосферы. Кроме того, вертикальная неоднородность атмосферы влияет на угловое распределение потока квантов таким образом, что гамма излучение, в основном, направлено в вертикальный конус с углом полураствора $40°$ или даже меньше. Наилучшее согласие теории с данными спутниковых измерений получено при условии, что полное число испущенных источником гамма-квантов $\sim 10^{17}$, а высота источника TGF составляет $10-14$ км. Этот результат согласуется с данными наблюдений [3], из которых следует, что источником TGF может быть отрицательный лидер интенсивного внутриоблачного разряда, который начинается на высоте около 10 км, а затем развивается вверх.

Отмечено, что вспышка TGF на указанных выше высотах должна сопровождаться возникновением потока гамма-квантов, направленных вниз к земле. Из представленной выше модели следует, что несмотря на сильное поглощение потока гамма-квантов в плотных слоях нижней атмосферы, он может быть обнаружен на земле в радиусе $10-20$ км от вертикальной оси, на которой расположен источник. Недавно такой поток гамма-квантов был впервые измерен на расстояниях $16-24$ км от молнии одновременно со вспышкой TGF, зафиксированной на спутнике [4].

1. Fishman G.J. et al. // Science, V. **264**(5163). P. 1313.
2. Carlson B.E., Lehtinen N.G., Inan U.S. // J. Geophys. Res. 2010. V. **115**. P. A10324
3. Cummer S.A. et al. // Geophys. Res. Lett. 2015. V. **42**. P. 7792.
4. Belz J.W et al. // J. Geophys. Res. Atmos. 2020. V. **125**(23).

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОТНОГО РАЗРЕЗА СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПЛОТНОСТИ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ ПО РАДИОЗАТМЕННЫМ ДАННЫМ

Акчурин А.Д., Хуторов В.Е., Хуторова О.Г.

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

На среднеширотных ионограммах вертикального зондирования часто появляются сигнатуры среднеширотных ПИВ среднего (с горизонтальными размерами 100-500 км) и малого масштабов. Причина их существования в среднеширотной ионосфере остается не полностью проясненной. В частности неясным вопросом является степень влияния состояния верхней/внешней ионосферы на появляемость среднеширотных дневных ПИВ. Однако возможности используемых сейчас методов зондирования (таких как некогерентное рассеяние, ионосферное радиозатенение, прямые спутниковые замеры) не позволяют надежно и постоянно выделять проявления ПИВ в верхней ионосфере, сводя измерения либо к изучению редких конкретных случаев, либо к формированию усредненных картин суточно-сезонных вариаций параметров верхней ионосферы, например, электронной концентрации. Измерения на ионозонде, созданном в КФУ, показывают определенную картину суточных вариаций появляемости осенних дневных ПИВ, которая могла бы быть связана с изменениями в состоянии верхней ионосферы. Поэтому мы изучили изменение состояния верхней ионосферы в форме суточной картины вертикального профиля электронной концентрации при двухмесячном усреднении радиозатменных данных. Профили используются для изучения внутрисуточных, высотных и полушарных (восточно-западных или грубых меридиональных) вариаций в зимний период (январь-февраль) и в периоды весеннего (март-апрель) и осеннего (сентябрь-октябрь) равноденствия.

В данной работе используются среднеширотные (40-60° северного полушария) профили электронной концентрации (Ne), полученные со спутников Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere, and Climate (COSMIC) в период низкой солнечной активности (2017-2019). Были отбракованы профили, показывающие значения *f*oF2 и *h*mF2 вне диапазона [1, 16] МГц и [150, 450] км, соответственно, как и профили с чрезмерными флуктуациями Ne. Рассматривались не только сами среднезональные профили электронной концентрации (Ne), но и профили среднеквадратического отклонения электронной концентрации от среднезонального значения (stdNe) в указанные периоды, а также производную среднего профиля электронной концентрации по высоте (dNe/dh). По суточному набору этих профилей собиралась среднесезонная картина высотно-суточного разреза вариаций Ne, stdNe и dNe/dh. Последние две картины считались опосредованными параметрами, характеризующими суточную появляемость и преобладающую высоту неоднородностей в различные сезоны.

Кроме суточного хода Ne, управляемого процессами ионизации и рекомбинации, выявляется более тонкая структура верхней ионосферы. В период осеннего равноденствия среднесезонные картины электронной концентрации имеют четыре максимума в западном полушарии в суточном ходе с 10 до 15 часов и два в восточном полушарии около 12 и 16 часов по местному времени. Зимой и весной такая суточная изменчивость не обнаруживается. Суточная картина dNe/dh, показывающая места с наибольшим высотным градиентом в верхней ионосфере потенциально благоприятным для создания неоднородностей при вертикальных перемещениях, имеет максимальные значения на высотах ~ 250 км. Однако расположения максимумов по времени и высоте в картине stdNe близки, но не совпадают, с расположением максимумов в картине dNe/dh. Это означает, что вертикальные перемещения вдоль силовых линий, например, под действием меридионального ветра, не смогут полностью объяснить появления наблюдаемых неоднородностей в верхней ионосфере.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИЕМНИКА ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА АРХИПЕЛАГЕ ЗЕМЛЯ ФРАНЦА-ИОСИФА В МАРТЕ 2021 ГОДА

Куприянов А.О.[1], Алибин Д.Ю.[1], Замогильный Д.[1], Мёрзлый А.М.[2,3], Никифоров О.В.[2], Петрукович А.А.[2], Сахаров Я.А.[4], Чернышов А.А.[2], Янаков А.Т.[2]

[1] *МИИГАИК, г. Москва, Россия, aoku28@gmail.com;*
[2] *ФГБУН Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия;*
[3] *Совет РАН по космосу, г. Москва, Россия;*
[4] *ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия.*

Оперативный мониторинг параметров ионосферы в Арктической зоне остаётся на данный момент актуальной задачей. Это связано в первую очередь с влиянием полярной ионосферы на функционирование средств связи, навигации и радиолокации. Возникающие магнито-ионосферные возмущения в Арктической зоне приводят к изменению условий распространения радиоволн различного диапазона. Ухудшение точностных характеристик радиотехнических средств различного назначения требует достоверного знания параметров среды распространения для разработки мер компенсации или уменьшения влияния возмущений полярной ионосферы.

Для отработки методик оперативного мониторинга ионосферы в Арктической зоне был проведен этап совместной комплексной арктической экспедиции (КЭ «Артика-21»). Этап проведен в период с 18 по 24 марта 2021 на острове Земля Александры архипелага Земля Франца-Иосифа (далее - ЗФИ) на станции «Омега» Национального парка «Русская Арктика» (далее НПРА). Первый этап КЭ «Артика-21» выполнялся в рамках комплексной экспедиции Русского географического общества «Умка-21».

Цель первого этапа – отработка технологии экспериментальной оценки и оперативного прогноза параметров высокоширотной ионосферы на ЗФИ в интересах решения научных и прикладных задач.

В докладе представлены следующие результаты:

- оценка текущей гелиогеофизической обстановки в период с 19 по 24 марта 2021 года;
- оценка текущих характеристик высокоширотной ионосферы (границ овала) по различным моделям;
- оценка текущих характеристик высокоширотной ионосферы (границ овала) по данным ГНСС;
- оценка оперативного прогноза текущих характеристик высокоширотной ионосферы (границ овала) по данным ГНСС;
- оценка влияния полученных экспериментальных данных на распространение радиоволн коротковолнового диапазона по моделям DMHI и КП РВ;
- требования к приемнику ГНСС для решения задач оценки и прогноза характеристик высокоширотной ионосферы, выявлены особенности его применения в Арктической зоне.

Влияние космической погоды на атмосферу Земли

О.А.Трошичев[1], С.В.Веретененко[2], И.П.Габис[1], И.А.Миронова[3], А.А.Криволуцкий[4]

[1] *Арктический и Антарктический НИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, olegtro@aari.ru*
[2] *Физико-Технический Институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия*
[3] *Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург, Россия*
[4] *Центральная аэрологическая обсерватория, г. Долгопрудный, Московская обл., Россия*

Даётся краткий обзор результатов экспериментальных исследований, свидетельствующих о влиянии космической погоды на атмосферу Земли. Рассмотрены эффекты воздействия энергичных частиц солнечного, галактического и магнитосферного происхождения на атмосферные процессы, определяющие климат на Земле. Солнечные протоны высоких энергий (SPE) оказывают мощное воздействие на фото-химические процессы в полярных областях и, соответственно, на атмосферную циркуляцию и планетарную облачность. Обнаружена интенсификация стратосферного полярного вихря в связи с увеличением скорости ионизации в средней атмосфере во время солнечных протонных событий, а также при росте геомагнитной активности. Вариации интенсивности полярного вихря могут являться причиной временной мультидекадной изменчивости эффектов солнечной активности в циркуляции нижней атмосферы. Представлены результаты спутниковых экспериментов, подтверждающие модельные расчёты изменения концентрации озона в полярных областях под действием солнечных протонов. Показано, что вариации солнечного УФ-излучения моделируют скорость спуска зональных ветров в экваториальной стратосфере в ходе квазидвухлетней осцилляции (QBO) и, таким образом, контролируют продолжительность QBO цикла и, соответственно, вариацию общего содержания озона в Антарктике. Геоэффективный солнечный ветер воздействует на систему катабатических ветров во всей южной полярной области и влияет на динамику южной осцилляции (ENSO). Показано, что высыпание энергичных электронов с энергией Ee=30–300 keV (EEP) изменяет степень ионизации в пространстве между поверхностью Земли и нижней границей ионосферы (где наблюдаются Шумановский резонанс) и ведёт к деформации этого пространства (ионосферно-земной полости). При этом глобальное распределение атмосферной проводимости (атмосферного электричества) определяется вторжениями солнечных протонов (SPE), галактических космических лучей (GCR) и наличием радоновых источников на земной поверхности. Таким образом, экспериментальные данные свидетельствуют о сильном воздействии различных агентов космической погоды и, соответственно, солнечной активности, на земную атмосферу и/или на земную погоду.

ОСОБЕННОСТИ КОНФИГУРАЦИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ В МЕСТАХ НАКОПЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ МАСШТАБЕ ВРЕМЕНИ

Подгорный А.И.[1], Подгорный И.М.[2], Борисенко А.В.[1]

[1]ФИАН, г. Москва, Россия, podgorny@lebedev.ru
[2]ИНАСАН, г. Москва, Россия

Продолжено МГД моделирование вспышечной ситуации в солнечной короне над реальной активной областью (АО) с целью решения задачи исследования физического механизма солнечной вспышки и, в дальнейшем, улучшения прогноза солнечных вспышек на основании понимания их физического механизма. Исследования еще раз подтвердили, что единственным механизмом, который может объяснить происходящее в солнечной короне медленное накопление магнитной энергии, а затем ее быстрое освобождение во время вспышки является механизм освобождения магнитной энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя. При исследовании других механизмов, в частности наиболее широко распространенного механизма жгута (rope), упрощенное МГД моделирование начинается с неустойчивой конфигурации, без объяснения того, как такая конфигурация может возникнуть. Результаты последних исследований, приводят к выводу, что изучение механизма вспышки невозможно без проведения МГД моделирования над реальной АО в предложенной нами постановке задачи, в которой наблюдаемое на фотосфере магнитное поле используется для задания граничных условий, и расчет начинается за несколько суток перед появлением вспышек, когда магнитная энергия для вспышки еще не накопилась в короне. Насколько нам известно, в настоящее время МГД моделирование в короне в такой постановке задачи проводится только нами.

Усовершенствованы методы МГД моделирования и получены физические результаты, позволяющие лучше понять механизм солнечной вспышки. Проведен ряд модернизаций методики вычислений, включающей использование специально разработанной абсолютно неявной конечно-разностной схемы, консервативной относительно магнитного потока, реализованной в программе ПЕРЕСВЕТ, и алгоритм вычислений, распараллеленных по технологии CUDA на графических процессорах (GPU). В результате частично решена проблема стабилизации численных неустойчивостей вблизи границы, что позволило провести МГД моделирование в реальном масштабе времени. Конфигурация магнитного поля часто оказывается настолько сложной, что по ней оказывается невозможно определить положение токового слоя. Токовые слои определяются при помощи специально разработанной системы графического поиска, использующей свойство токового слоя, согласно которому максимальное значение плотности тока достигается в центре токового слоя. МГД моделирование показало появление максимумов плотности тока, располагающиеся на особых линиях магнитного поля Х-типа, в окрестности которых образуется токовые слои. Кроме того, в окрестности значительного числа максимумов плотности тока магнитное поле представляет собой наложение конфигурации Х-типа и расходящегося магнитного поля (поля пробкотрона). В таком наложении конфигураций, да если расходящееся поле преобладает, возможно образование достаточно мощного токового слоя, из-за присутствия поля Х-типа. Образовавшийся токовый слой может объяснить появление вспышки малой и средней мощности. Возможно, по этой причине солнечные вспышки над АО 10365 26 и 27 мая 2003 года были не очень большими. Совпадение положения источника вспышечного теплового рентгеновского излучения с местами на особых линиях, в которых токовый слой образовался или мог образоваться, подтверждает механизм солнечной вспышки, основанный на накоплении энергии в магнитном поле токового слоя.

ОБЩИЕ ПЕРИОДЫ МОЩНЫХ КОМПОНЕНТ СПЕКТРОВ МОДУЛЯ ММП, АТМОСФЕРНОГО УГЛЕРОДА С14, СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ И ГЛОБАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗЕМЛИ, ИХ СВЯЗЬ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ СОБЫТИЯМИ

Кузнецова Т.В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, tvkuz3@gmail.com

Анализ спектров модуля межпланетного магнитного поля (ММП), содержания атмосферного углерода (С14), скорости вращения (ω) и глобальной температуры Земли (Tgl) показал общий период вблизи 200 лет у мощных компонент спектров. Среди перечисленных 4-х компонент в анализе присутствует спектр модуля ММП, связанный с солнечной активностью и полученный нами ранее на основе измерений в солнечном ветре вблизи орбиты Земли [1]. Спектр С14 опубликован нами в [2], а спектр ω в [3]. Анализ позволил установить, что общий интервал периодов с учетом ошибок их определения для всех 4х компонент Tall=(202.55±0.95) лет. Показано, что нижняя граница периодов Tlb=201.6 л. отмечена орбитальным резонансом Земля-Венера 8/13 и резонансом тропического года и синодического периода Венеры 8/5, а также содержит целые числа сидерических периодов Юпитера и соединений Венера-Сатурн. Средний период Tm=202.6 лет отмечен целыми числами циклов затмений Inex и периодов соединений Юпитер-Венера. Серия затмений Inex длится многие тысячи лет, давая каждое следующее затмение через ~28.945 л. почти на той же долготе, но на противоположной широте. Результат означает, что при Tm=7Inex будет похожее затмение почти на той же долготе, но противоположной широте через 202.6 л, что имеет прикладное значение. Вблизи верхней границы спектральной полосы Thb=203.2 г. отмечены резонансы Венера-Земля 8/13 и 8/5 вместе с целыми числами периодов соединений Венера-Юпитер и Венера-Сатурн. Заканчивается полоса периодом Thb=203.5 л, включающим целое число циклов затмений Tzolkin. Обсуждаются мощные спектральные компоненты скорости вращения Земли (с периодами ~72 года и ~33 года), полученные в [3]. А также 33-летняя мощная нестационарная компонента Tgl с наибольшей скоростью изменения, объясняющая быстрые изменения глобальной температуры [4]. В заключение обсуждается связь рассмотренных компонент спектров с экстремальными событиями.

1. Kuznetsova, T.V., Tsirulnik, L.B., 2008. Time changes of solar activity, interplanetary magnetic field and solar wind velocity at the Earth's orbit in different spectral bands. J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 70, 254–260.
2. Kuznetsova, T.V., Tsirulnik, L.B., 2004. Climate oscillations and abrupt changes in C-14 data. Adv. Space Res. 34, 426–431.
https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273117704002509
3. Kuznetsova, T.V., 2010. Influence of space climate and space weather on the Earth. Sun and Geosphere 5 (No.2), 17–31.
4. Kuznetsova T.V. Long-term spectral components of global, north and south hemisphere temperatures over the last millennium and solar-lunar forcing. J. Atmos. Sol. Terr. Phys. volume 211, November, 2020 https://doi.org/10.1016/j.jastp.2020.105393

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕЖГОДОВЫХ ВАРИАЦИЙ АТМОСФЕРНОЙ И ИОНОСФЕРНОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ПО ДАННЫМ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ И РАДИОФИЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Медведева И.В.[1,2], Ратовский К.Г.[1], Толстиков М.В.[1]

[1] *ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия, ivmed@iszf.irk.ru*
[2] *ИФА им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия*

Проведено исследование межгодовых вариаций температуры области мезопаузы и максимума электронной концентрации в 24-м солнечном цикле. Использована разработанная ранее методика оценки атмосферной и ионосферной изменчивости, которая позволяет анализировать проявление волновой активности в широком диапазоне высот верхней атмосферы. Температурные данные получены при помощи спектрометрических измерений параметров эмиссии молекулы гидроксила (полоса (6-2), 834.0 нм, ~87 км), в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (51.8° N, 103.1° E, Торы). Значения максимума электронной концентрации NmF2 получены по данным вертикального зондирования на иркутском ионозонде DPS-4 (52.3° N, 104.3° E). К анализу привлечены данные о солнечной и геомагнитной активности, а также о вариациях индекса Южной осцилляции (Southern Oscillation Index) в формате Climatic Research Unit of East Anglia University. Анализируемый период 2008-2020 гг. Исследованы и сопоставлены межгодовые вариации изменчивостей температуры мезопаузы и максимума электронной концентрации в различных временных периодах: межсуточные вариации ($T > 24$ ч), приливные вариации (8 ч $\leq T \leq 24$ ч), а также вариации с периодами внутренних гравитационных волн ($T < 8$ ч).

Анализ межгодовых вариаций изменчивости температуры мезопаузы показал следующее. Поведение межсуточной изменчивости коррелирует с вариациями SOI, с пиком изменчивости в фазе Ла Ниньа (максимум SOI в 2011 г.) и минимумом в фазе Эль Ниньо. Значения температурной изменчивости в результате влияния приливов и ВГВ минимальны в 2011 и 2012 гг, когда наблюдались максимальные значения SOI (наибольшие за 50 лет) и фаза Ла Ниньа. Анализ межгодовых вариаций ионосферной изменчивости и их сопоставление с изменениями геомагнитной и солнечной активности выявил, что однозначно с геомагнитной активностью коррелирует только межсуточная ионосферная изменчивость. Обнаружена антикорреляция коротковолновой (с периодами ВГВ) изменчивости максимума электронной концентрации и солнечной активности. Максимальная ВГВ активность наблюдается в годы минимума солнечной активности, минимальная – в годы максимума. Анализ среднегодовых значений максимума электронной концентрации NmF2 показал, что в межгодовые вариации среднегодовых значений NmF2 доминирующий вклад вносит солнечная активность, а вкладом геомагнитной активности можно пренебречь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00212. В работе были использованы экспериментальные данные оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» http://ckp-rf.ru/ckp/3056/, алгоритмы и методы анализа, разработанные при финансовой поддержке Минобрнауки России.

ЭФФЕКТЫ СОЛНЕЧНЫХ ПРОТОННЫХ СОБЫТИЙ ЯНВАРЯ 2005 ГОДА В ЦИРКУЛЯЦИИ СТРАТОСФЕРЫ СЕВЕРНОГО И ЮЖНОГО ПОЛУШАРИЙ

Веретененко С.В.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург, Россия, s.veretenenko@mail.ioffe.ru

В работе [1] было обнаружено, что солнечные протонные события (СПС) января 2005 г. сопровождались значительным усилением западного ветра в стратосфере высоких широт северного полушария, что свидетельствует об интенсификации стратосферного полярного вихря. В настоящей работе исследуются эффекты СПС января 2005 г. в циркуляции стратосферы южного полушария по данным реанализа-2 NCEP-DOE [2]. В ходе исследуемых событий в верхней стратосфере (30-10 гПа), где в летний период (декабрь-февраль) во всем полушарии доминирует восточный перенос воздушных масс, обнаружено ослабление восточных ветров в умеренных и высоких широтах (>40ºS) и усиление в низких. В нижней стратосфере (100-50 гПа), где циркуляция характеризуется наличием западного переноса в умеренных широтах, ослабление восточных ветров имело место только в полярной области (>60ºS), при этом максимум зонального западного потока смещался к высоким широтам.

Проведен сравнительный анализ эффектов СПС января 2005 г. в циркуляции стратосферы северного и южного полушарий. Показано, что в северном (зимнем) полушарии эффекты СПС в вариациях скорости зонального ветра выражены сильнее, чем в южном (летнем) полушарии. Предположено, что возмущения циркуляции, обнаруженные в обоих полушариях в ходе исследуемых СПС, могут быть обусловлены изменениями температурного режим полярной атмосферы в связи с изменениями ее химического состава (уменьшением содержания озона) при увеличении скорости ионизации.

1. Veretenenko S., Ogurtsov M. // Geomagn. Aeron. 2020. V. **60**. P. 974.
2. Kanamitsu M. et al. // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2002. V. **83**. P. 1631.

ПРОЯВЛЕНИЕ 11-ЛЕТНЕГО СОЛНЕЧНОГО ЦИКЛА В ОБЩЕМ СОДЕРЖАНИИ O_3 И NO_2 ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ НА НАУЧНЫХ СТАНЦИЯХ ИНСТИТУТА ФИЗИКИ АТМОСФЕРЫ ИМ. А.М. ОБУХОВА РАН

Груздев А.Н., , Еланский Н.Ф., Арабов А.Я., Елохов А.С., Савиных В.В., Сеник И.А., Боровский А.Н.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия,
a.n.gruzdev@mail.ru

На Звенигородской научной станции (ЗНС) и Кисловодской высокогорной научной станции (КВНС) Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН на протяжении примерно трех десятков лет выполнялись измерения общего содержания (ОС) NO_2 и O_3. ЗНС расположена в сельской лесистой местности в 40 км к западу от Москвы. КВНС расположена на высоте 2000 м над уровнем моря на северном Кавказе в 20 км южнее г. Кисловодска и в 50 км к северу от Главного Кавказского хребта и горной вершины Эльбрус.

Озонные измерения выполняются с 1989 г. на КВНС по прямому и рассеянному из зенита ультрафиолетовому солнечному излучению. ОС NO_2 измерялось на КВНС по прямому солнечному излучению видимого диапазона утром и вечером с 1981 по 2008 гг. На ЗНС с 1990 г. выполняются измерения содержания NO_2 по рассеянному из зенита солнечному излучению видимой области спектра во время утренних и вечерних сумерек.

Анализ многолетней изменчивости данных измерений выполнен с помощью метода множественной линейной регрессии. Получены годовые и сезонно-зависимые оценки линейных трендов O_3 и NO_2 и вариаций ОС O_3 и NO_2, связанных с 11-летним циклом солнечной активности, квазидвухлетней цикличностью в экваториальной стратосфере, Арктическим колебанием, вариациями температуры поверхности океана в области Ниньо-3.4 (восточная и центральная часть экваториальной области Тихого океана).

Отклик ОС NO_2 на ЗНС на солнечный цикл в целом за год не выявлен, изменения ОС NO_2 на КВНС составляют в целом за год 5–6%, а изменения ОС O_3 – около 1.5%. Однако отклик на солнечное воздействие в отдельные сезоны существенно сильнее. Значительный эффект солнечного цикла в ОС NO_2 на ЗНС проявился в конце зимы и начале весны. Колебания NO_2 противоположны по фазе 11-летнему солнечному циклу. В это время года ОС NO_2 на ЗНС в годы минимума солнечной активности в среднем больше, чем в годы максимума солнечной активности на 7–10%. В летний период, когда радиационное воздействие колебаний уровня солнечной активности в средних широтах максимально, эффект солнечного цикла в NO_2 на ЗНС ~3% проявляется приблизительно в фазе с солнечным циклом.

Солнечный сигнал в ОС O_3 и NO_2 на КВНС выявлен в течение большой части года. Максимальный (в относительных единицах) отклик ОС NO_2 на солнечный цикл проявился зимой. Изменение ОС NO_2 между минимумом и максимумом солнечной активности составило в декабре-феврале 11–13% по данным утренних измерений и около 20% по данным вечерних измерений. Значительный эффект ~7–9% выявлен летом.

Изменения ОС NO_2 на КВНС, связанные с солнечным циклом, можно приблизительно считать противофазными ему. Таким образом, зимний отклик NO_2 на КВНС и весенний отклик NO_2 на ЗНС на солнечный цикл вполне соответствуют друг другу по фазе, но летние отклики примерно противоположны между собой по фазе.

Изменения ОС O_3 на КВНС под действием солнечного цикла проявляются в максимальной степени летом, достигая 4.5%. Изменения, проявляющиеся в течение большой части года, с конца весны по осень, происходят примерно в фазе с солнечным циклом.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 20-05-00274 (измерения на ЗНС), и РНФ, проект 21-17-00210 (анализ данных).

РЕАКЦИЯ АТМОСФЕРЫ НА ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ СОБЫТИЯ ВЫСЫПАНИЙ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Миронова И.А.[1,2], Синнхубер М.[3], Базилевская Г.А.[4], Бортакур М.[3], Гранкин Д.В.[1], Карагодин А.В.[1,5], Махмутов В.С.[4], Пикулина П.О.[1], Розанов Е.В.[1,5], Суходолов Т.В.[1,5], Яковчук О.С.[6] и Виссинг Я.М.[6]

1. *Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия, i.a.mironova@spbu.ru*
2. *Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва, Россия*
3. *Институт метеорологии и исследований климата, Технологический институт Карлсруэ, Карлсруэ, Германия*
4. *Физический институт им. Лебедева РАН, Москва, Россия*
5. *PMOD/WRC и IAC ETHZ, Давос, Швейцария*
6. *University of Rostock*

Высыпания энергичных частиц в атмосферу Земли регистрируются с помощью спутниковых и наземных наблюдений, а так же во время баллонных измерений. Следовательно, сочетание разных типов наблюдений может привести к получению новой информации о спектрах энергичных частиц (информации по энергиям и потокам). Оценка реакции атмосферы на высыпание энергичных частиц требует знания скоростей ионизации атмосферы, создаваемой этими частицами. Хорошо известно, что энергичные частицы (электроны или протоны) увеличивают скорость ионизации в средней атмосфере, увеличивая образование HOx и NOx, участвующих в каталитическом цикле разрушения озона. Здесь мы изучаем реакцию атмосферы на экстремальные события связанные с высыпания энергичных частиц во время корональных выбросов солнечных масс, во время суббурь, а также в во время уменьшения потоков галактических космических лучей, данный эффект известен как Форбуш-эффект.

В данной работе представлены результаты оценок реакции химического состава и озонового слоя на осаждение энергичных частиц в декабре 2009 г. [1], сентябре 2017 г. [2] и январе 2005 г. [3], проанализированные с помощью одномерных моделей с полным описанием ионной химии D-области и глобальных трехмерных химико-климатических моделей. Полученные новые результаты дополняют наше растущее понимание того, как высыпания энергичных частиц влияют на озоновый слой, и обеспечивают основу для понимания их кумулятивного воздействия на атмосферу и климат.

Работа выполнена в рамках проекта российского-германского сотрудничества «H-EPIC», финансируемого Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 20-55-12020) и Германским исследовательским фондом DFG (грант SI 1088/7 -1). Анализ событий 2017 года выполнен при поддержке гранта Российского научного фонда (проект РНФ № 20-67-46016). Работы ЕР, ИМ, ДГ, ПП, ТС, АК выполнены в СПбГУ «Лаборатория исследования озонового слоя и верхних слоев атмосферы» при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по договору 075-15-2021-583 .

1. Mironova et al, ACPD, 2021
2. Pikulina et.al, Remote Sensing, submitted 2022.
3 Mironova et al, Front. Earth Sci. 8:618583. doi: 10.3389/feart.2020.618583, 2021

ИОНИЗАЦИЯ АТМОСФЕРЫ, ВЫЗВАННАЯ СОЛНЕЧНЫМИ ПРОТОНАМИ В ПОЛЯРНЫХ ОБЛАСТЯХ ЗЕМЛИ И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОЗОНОСФЕРУ И ИОНОСФЕРУ

А.А. Криволуцкий, А.А. Куколева, М.В. Банин

Центральная аэрологическая обсерватория (ЦАО) Росгидромета,г. Долгопрудный М.О., Россия krivolutsky@mail.ru

Приводятся результаты трехмерного численного фотохимического моделирования изменений химического нейтрального и заряженного состава атмосферы Земли, вызванных увеличением потока солнечных протонов в период вспышки на Солнце в октябре 2003 года. Для расчетов отклика на воздействие частиц была использована глобальная фотохимическая модель CHARM-I (Chemical Atmospheric Research Model with Ions [1]), а также модель общей циркуляции ARM (Atmospheric Reseach Model [2]), созданные в Лаборатории химии и динамики атмосферы ЦАО. Эффект воздействия вспышки на фотохимию нейтральных и заряженных частиц закладывался в модель при реализации численного сценария через соответствующие эффективности воздействия [3,4]. Потоки частиц брались по наблюдениям американского геостационарного спутника GOES. Результаты расчетов показали, что изменения в содержании озона и электронной концентрации (область D) в полярных широтах составляют десятки %, что может повлиять, на условия распространения и поглощения радиоволн.

1. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю., Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, № 4, с. 483-503, 2015.

2. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Вьюшкова Т.Ю., Репнев А.И., Ключникова А.В. Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах 0-135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности. Геомагнетизм и аэрономия, том 55, №6, с. 808-828, 2015.

3. *Turco R.P., Whitten R.C.* A comparison of several computational techniques for solving some common aeronomic problems, J. Geophys. Res. V. 79. N 22. P. 317 − 319. 1974.

4. Rapp D.P. et al., Cross section for the dissociative ionization of molecules by electron impact, J. Chem. Phys., 42, 4081, 1965.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА РАЗВИТИЕ ЭКЗОГЕННЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ В 2017 – 2021 ГОДАХ

Мальнева И.В., Черкесов А.А..

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, malnir@mail.ru

Представлены результаты исследований влияния космической погоды на развитие экзогенных геологических процессов (оползней, селей и др.) в в Приэльбрусье и метеорологические условия их формирования по данным метеостанции Терскол ежедневно за 2016 – 2021 годы. Использованы материалы, размещенные в сети Интернет, на сайтах spaceweather.com, tesislebedev.ru В первую очередь, это скорость солнечного ветра в околоземном пространстве и плотность протонов в нем. При этом экзогенные геологические процессы рассматриваются как многокомпонентная система, главным звеном в которой является энергия, непрерывно поступающая от Солнца.

За указанные годы солнечная активность была наибольшей в 2017 году (пятна на Солнце, с которыми связаны вспышки, магнитные бури). Именно в этом году наблюдалось катастрофическое проявление селей в ущелье Адылсу связанное с прорывом озера Башкара, сели в ущелье р. Герхожансу. В течение августа отмечались высокие значения скорости солнечного ветра и, особенно, плотности протонов. 30 – 31 августа скорость ветра доходила до 630 км/с, а плотность протонов в ночь с 31 августа на 1 сентября – от 21,7 до 52,6 ед./см^3[*http://spaceweather.com*,].

В 2018 году активность Солнца была очень низкой. Пятен на Солнце в начале лета почти не было, практически не было вспышек, наблюдались отдельные корональные дыры и небольшие магнитные бури..Эти процессы и способствовали формированию погоды в регионе и наводнению в долине р. Баксан в ночь с 4 на 5 июля.

В 2019 году активность Солнца была также очень низкой. За летний период не было ни одной вспышки выше минимального уровня, но отдельные всплески плотности протонов обеспечили метеорологические условия при которых за один день прошли сели по многим водотокам. Массовая активизация оползней и селей в июле 2019 года произошла 24 июля. В ночь на 22 июля произошло протонное событие. Плотность протонов резко подскочила до 75 и выше от 10 ед./см^3..

29 мая 2020 г произошла первая крупная вспышка на Солнце в этом году, Последний раз вспышка сравнимого уровня произошла в 2017 году непосредственно перед впадением нашей звезды в долгую почти трехлетнюю спячку. Также произошли и менее значительные вспышки. Естественно, с подобными событиями связано поступление энергии путём прорывной инжекции в частности в район оползня Бузулган, расположенного в долине р. Герхожансу (бассейн р. Баксан) большого количества энергии, которое могло стать важнейшим фактором в развитии оползневого процесса. 2 -3 августа Земля снова входит в поток солнечного ветра (более 500-700 км/с). **13 – 14 августа 2020 г произошла**. **аномальная подвижка оползня Бузулган.** Такого события местные жители не помнят более 50 лет. На основании рассмотренных данных, можно отметить, что аномальная подвижка оползня Бузулган летом 2020 г. произошла вследствие синергетического воздействия многих факторов, среди которых космическая погода могла иметь большое значение.

В 2021 году характер активности Солнца начал меняться. Однако различные события в этом году чаще происходят на обратной стороне Солнца и не оказывают очень большого влияния на развития процессов на Земле, хотя это влияние в той или иной степени проявляется. По-видимому, в ближайшие годы увеличение активности селей и других опасных природных процессов почти неизбежно, поскольку молодой солнечный цикл 25 набирает обороты в предстоящие годы (speaceweather.com).

ОСОБЕННОСТИ ПАНДЕМИИ COVID-19 В ГЛОБАЛЬНОМ МИНИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ: ГЕНОГЕОГРАФИЯ, ЛОКДАУНЫ, ВАКЦИНАЦИЯ.

Рагульская М. В.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, ra_mary@mail.ru

Динамика солнечной активности (СА) и генетическая изменчивость человечества повышают шансы человека на выживание как биологического вида во время пандемий. Космическая погода и СА в первую очередь влияют на мутации и изменчивость вируса, а также повышают адаптационную устойчивость человеческой популяции. В докладе рассматриваются 5 факторов, которые могли бы объяснить большую разницу в смертности от коронавируса в разных странах (в 4-8 раз против 2 раз во время эпидемий обычного гриппа): 1. Факторы космической погоды; 2. Генетические популяционные особенности; 3. Температура; 4. Эффекты локдаунов; 5. Массовая вакцинация.

Пандемии гриппа 1880-2019 гг. регистрировались только в максимуме или минимуме 11-летнего цикла солнечной активности. Пандемия COVID-19 также стартовала в минимумах 11-летнего и квази - векового солнечного цикла. Генетические популяционные особенности сыграли решающую роль в развитии локальных эпидемий коронавируса в условиях минимума СА. Их вклад составляет более 500% против 20-30%, приходящихся на остальные рассматриваемые факторы (кроме вакцинации). Наиболее тяжелое течение COVID-19 и самая высокая относительная смертность на 1 миллион населения характерны для стран с доминирующей гаплогруппой R1b (до 35 смертей/млн в день). Гаплогруппа R1a характеризуется быстрым распространением коронавируса и большим количеством бессимптомных больных (до 7 смертей/млн). Легче всего развитие локальных эпидемий наблюдалось в европейских странах с преобладанием гаплогруппы N (до 3 смертей/млн). Уровень коллективного иммунитета (переболевшие + вакцинированные) также может зависеть от генетического состава популяции. Его значение наиболее высоко для стран с доминирующей гаплогруппой R1b. Этот эффект можно объяснить и генетическими различиями лейкоцитарных антигенов, и адаптивными изменениями образования оксида азота и кислорода в организме человека под влиянием факторов космической погоды. Также необходимо учитывать различие исторических процессов адаптации человечества к вирусам гриппа и коронавирусам для разных гаплогрупп и континентов за последние 20 000 лет.

Заболеваемость COVID-19 на миллион человек в гаплогруппах R1b:R1a:N имеет соотношение примерно 7:2:1. Это соотношение практически не зависит от волн пандемии, новых штаммов коронавируса и уровня вакцинации населения. В условиях глобального минимума солнечной активности можно ожидать двукратный рост числа пандемий в ближайшие 30 лет (каждые 5-6 лет вместо 10-11 лет) с ярко выраженными геногеографическими различиями.

Изучение роли генетической изменчивости в развитии COVID-19 выявляет лиц с повышенным риском заболевания. Введение первичной генетической диагностики медицинского персонала может определить более устойчивых к SARS-CoV-2 работников больниц и скорой помощи для оптимизации оказания медицинской помощи населению и защиты самих врачей. Также понимание геногеографических особенностей распространения и тяжести течения пандемии (с учетом динамики солнечной активности) может помочь в планировании эпидемиологических и организационно-карантинных мероприятий, и обеспечить заблаговременное распределение средств и медицинских ресурсов по наиболее проблемным территориям.

1. Ragulskaya M. Solar activity and COVID-19 pandemic // Open Astron. 2021; V 30, n. 1. P. 149–158 https://doi.org/10.1515/astro-2021-0020

АНИМАЦИОННЫЙ ФИЛЬМ «ЧИЖЕВСКИЙ. ПУТЬ К СОЛНЦУ» КАК НОВАЯ ФОРМА ПОПУЛЯРИЗАЦИИ ИДЕЙ РУССКОГО КОСМИЗМА

Звонова Е.Е., Голованов Д.Л.

Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации, ИНИОН РАН, г. Раменское, Россия, inflammatur@yandex.ru, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, dm_golovanov@mail.ru

В настоящее время остается актуальной задача преодоления разрыва между обучением воспитанием, интеллектом и аффектом в образовании[1]. Его преодоление видится нам на путях наделения рациональных форм познания мира нравственным статусом и трансляции соответствующей мировоззренческой позиции учащимся. Для реализации данного подхода целесообразно популяризировать среди них идеи философии русского космизма, поскольку в них наука неразрывно связана с общечеловеческими моральными ценностями и рассматривается как средство преобразования природы во имя общего блага [3].

Мы полагаем, что оптимальной формой представления идей космизма школьникам и студентам в связи с задачей синтеза интеллекта и аффекта в образовании является искусство. Основываясь на этом убеждении, мы организовали проект по созданию анимационного фильма о философе-космисте и ученом-энциклопедисте [3, 4], одном из основоположников космического естествознания А.Л. Чижевском [2], результат которого представляем вашему вниманию [5].

1. Звонова Е.Е. Потенциал идей русского космизма для интеграции интеллекта и аффекта в образовании // Философия. История. Образование. 2021. №2 (2), URL: https://fio.fa.ru/journal/article.php?id=2149.

2. Звонова Е.Е. Судьба и творчество А.Л.Чижевского в связи с проблемой соотношения интеллекта и аффекта в образовании // А.Л. Чижевский. Вклад в науку и культуру. 2019. С. 185 – 187.

3. Голованов Д.Л. Полигимния за колючей проволокой. Научное и художественно-поэтическое творчество А.Л. Чижевского в условиях заключения и ссылки (1942-1958). - М.: Гелиос, 2018. - 45 с.

4. Голованов А.Л., Голованов Д. Л., Голованова О.Д. К 100-ЛЕТИЮ ЗАЩИТЫ А.Л. ЧИЖЕВСКИМ ДИССЕРТАЦИИ ФИЗИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ИСТОРИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА//Тринадцатая ежегодная конференция Физика плазмы в солнечной системе, Материалы. — Москва: ИКИ РАН, 2018. — С. 4–4.

5. Тизер-реклама мультфильма «А.Л. Чижевский. Путь к Солнцу» https://zen.yandex.ru/id/60abc51908fcd61ad0a6de8f

РЕЗУЛЬТАТЫ МГД МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ ПЕРВОЙ ВСПЫШКИ НАД АКТИВНОЙ ОБЛАСТЬЮ 10365

А.В. Борисенко[1], И.М. Подгорный[2], А.И. Подгорный[1]

[1]*ФИАН, г. Москва, Россия; e-mail: sunw77@mail.ru*
[2]*ИНАСАН, г. Москва, Россия*

Первые результаты МГД моделирования в реальном масштабе времени над мульти-вспышечной активной областью (АО) 10365 подтвердили механизм, согласно которому во время вспышки происходит быстрое освобождение энергии, накопленной в магнитном поле токового слоя. Поскольку конфигурации магнитных полей в короне достаточно сложны, использовалась ранее разработанная система поиска токовых слоев, согласно которой максимум плотности тока достигается в середине токового слоя. Положение максимума плотности тока указывает на возможное расположение в этом месте токового слоя или процесс накопления энергии возмущений, приводящий к образованию токового слоя. Максимумы плотности тока располагаются на особых линиях магнитного поля, в окрестности которых появляются токовые слои.

МГД моделирование над АО 10365 до появления первой вспышки (M 1.9 GOES 26/05/2003 UT 05:34) показали образование областей с максимумами плотности тока в окрестности особой линии магнитного поля X-типа на высотах 16-18 Мм. По данным радиогелиографа Nobeyama NoRh 17 ГГц в областях с максимумами плотности тока наблюдалась яркая пред-вспышечная эмиссия, перед первой вспышкой наблюдался всплеск радиосигнала на волне 17 ГГц., что указывает на присутствие сильных магнитных полей в нижней короне над АО.

Как показали результаты МГД моделирования, в окрестностях значительного числа максимумов плотности тока магнитное поле представляет собой более сложную конфигурацию. Эта конфигурация представляет собой наложение магнитного поля X-типа и расходящегося магнитного поля. Но несмотря на влияние расходящегося магнитного поля вблизи магнитной конфигурации X-типа, токовый слой все же может появиться. Данные радиогелиографа Nobeyama NoRh 17 ГГц показали эволюцию токового слоя до и после первой вспышки, тем самым подтвердив появление токового слоя в полученной по результатам МГД моделирования магнитной конфигурации в короне.

Проведенное МГД моделирование вспышечной ситуации в реальном масштабе времени указывает на возможность решения задачи исследования физического механизма солнечной вспышки и, в дальнейшем, возможности улучшения прогнозов солнечных вспышек на основании понимания их физического механизма.

ВЛИЯНИЕ ВАРИАЦИЙ УФ РАДИАЦИИ СОЛНЦА В ЦИКЛЕ ЕГО АКТИВНОСТИ НА СОСТАВ И ДИНАМИКУ АТМОСФЕРЫ. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Куколева А.А., Криволуцкий А.А., Банин М.В.

ЦАО Росгидромет, г. Долгопрудный, Россия, kuan-2012@yandex.ru

Представлены результаты компьютерного моделирования реакции атмосферы на изменения излучения Солнца в ультрафиолетовом участке спектра в 23 цикле солнечной активности с использованием численных глобальных моделей [1-2].

Для расчетов изменений солнечной радиации были использованы данные об изменении интенсивности излучения в спектре Солнца с сайта [3] в диапазоне 115 до 850 нм (результаты реконструкции на основе данные наблюдений и моделирования) за 2003 и 2009 годы. Эти данные были заложены в 3D фотохимическую модель CHARM [2], а также в радиационный блок 3D модели общей циркуляции ARM [1].

Согласно расчетам, колебания радиации Солнца в ультрафиолетовом участке спектра приводят к изменениям содержания озона на 3-15 % в мезосфере. Этот результат учитывался при расчетах изменений циркуляции в модели ARM.

Были рассчитаны изменения температуры, скоростей ветра в атмосфере в диапазоне высот до 130 км для условий зимы в северном полушарии (декабрь). По результатам моделирования в максимуме солнечной активности (СА) температура в слое h > 100 км повысилась на 10-35^0 над всеми широтами по сравнению с условиями минимума активности. Повышение на 5-15^0 предсказывают расчеты также в полярной зимней стратосфере (40-60 км) и понижение на 10-20^0 в верхней мезосфере и термосфере (80-100 км)

Зональный перенос значительно ослаблен при максимуме СА выше 40 км: скорость западного ветра в слое 40-80 км снизилась вдвое: с 60 до 30 м/с, а восточного в слое 90-110 км – снизилась с 50 до 30 м/с. Наиболее выражен этот эффект в северном (зимнем) полушарии, а также экваториальной и тропической зонах обоих полушарий.

1. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Вьюшкова Т.Ю., Репнев А.И., Ключникова А.В. Глобальная циркуляция атмосферы Земли на высотах 0-135 км, рассчитанная с помощью модели ARM. Учет вклада солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия 2015. Т. 55. №6, 2015.

2. Криволуцкий А.А., Черепанова Л.А., Репнев А.И., Вьюшкова Т.Ю. Трехмерная численная глобальная фотохимическая модель CHARM-I. Учет процессов в области D ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия 2015. Т. 55, № 4. с. 483-503.

3. https://lasp.colorado.edu/lisird/data/empire_ssi/.

ПРОГНОЗ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ОЗОНОВОЙ ДЫРЫ В АНТАРКТИКЕ ДО 2025 ГОДА

Габис И. П.

ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия, gabis@aari.ru

Долгосрочное прогнозирование мощности озоновой дыры в Антарктике основано на связи циркуляции тропической и полярной областей и доминирующем влиянии квазидвухлетних осцилляций (КДО) экваториальной стратосферы на интенсивность межгодовых вариаций озоновой дыры в антарктической стратосфере.

Зависимость озоновой дыры от КДО подтверждается высокой корреляцией между наблюдаемыми и модельными вариациями параметров озоновой дыры, которые определены по экспериментальным данным за длительный интервал времени для циклов КДО разных сценариев.

Долгосрочный прогноз циклов КДО возможен вследствие сезонных закономерностей КДО и дискретного изменения периода КДО, которые объясняются влиянием вариаций УФ излучения Солнца.

С помощью эмпирических моделей для межгодовых изменений параметров, характеризующих озоновую дыру, имея долгосрочный прогноз КДО, можно на тот же срок прогнозировать изменения мощности озоновой дыры в Антарктике. Представлен прогноз КДО и межгодовых вариаций озоновой дыры до 2025 года.

ЭФФЕКТ СНЕГА НА СЕТИ НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ

Янке В.Г., Трефилова Л.А., Кобелев П.Г.

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

Для средне- и высокоширотных нейтронных детекторов, особенно горных, снег является большой проблемой, поскольку он эффективно накапливается над детектором и вокруг него. Поэтому сильно искаженные переменным слоем снега данные мониторинга не пригодны для изучения многих типов вариаций и в дальнейшем требуют соответствующей корректировки. Действительно, точность регистрации стандартного нейтронного монитора 0.15%/час. А уже один сантиметр плотного снега толщиной 0.5 см в.э. над детектором приводит к искажению наблюдаемых вариаций на 0.4%.

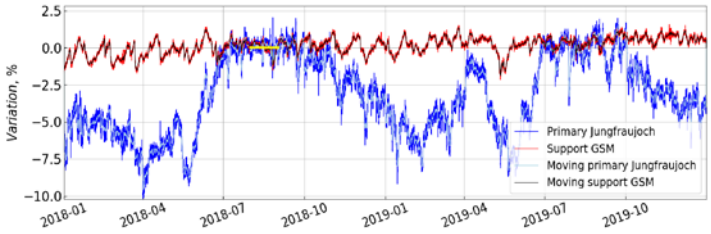


Рис.1. Сравнение вариаций опорного GSM (красная кривая) и анализируемого (синяя кривая) детектора.

Принцип корректировки “на снег” базируется на сравнении вариаций, регистрируемых на анализируемом и на опорном детекторе. В качестве опорного сигнала можно использовать данные детектора, свободного от снега, или результат глобально спектрографического метода (GSM) по данным Мировой сети детекторов [Belov et al., 18th ICRC, V.10, P.144, 1983; GA, 58(3), 356, 2018]. В данной работе мы впервые применили второй подход. На рис.1 и рис.2 приведен анализ для детектора *Jungfraujoch-3nm64*, на котором эффект снега выражен наиболее ярко. На рис.2 для 2018-2019 годов проведено сравнение толщин снега, полученных двумя методами: методом опорной станции *Jungfraujoch-12nm57* [Kobelev et al., XLII Annual Seminar, P.52, 2020] и GSM (верхняя панель, красная и синяя кривые).

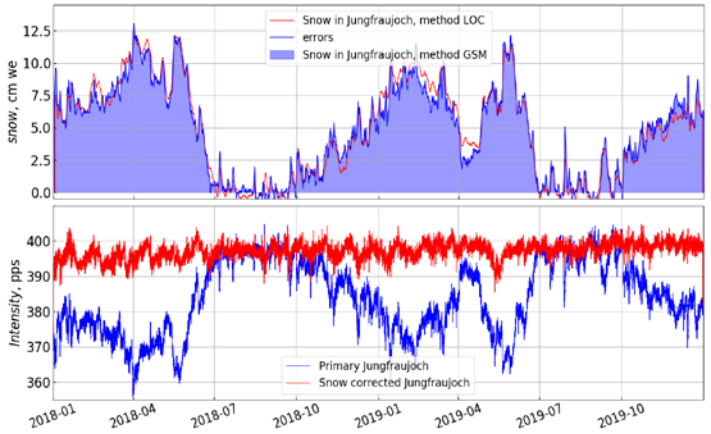


Рис.2. Эффективная толщина снежного покрова, определенная с привлечением одиночной опорной станции (метод LOC, красная линия) и с привлечением результатов GSM (синяя). На нижней панели неисправленная и исправленная скорость счета.

В итоге отметим, что привлечение результатов GSM анализа позволило гарантировать хорошую стабильность и, по крайней мере, 5-ти кратное повышение статистической точности, а также полную непрерывность ряда данных опорного детектора, что обеспечивает новизну и уникальность работы. Однако, модельный подход несколько увеличивает систематические ошибки.

Результаты могут быть использованы при верификации данных сети нейтронных мониторов. Методика позволяет сделать оценки толщины снежного покрова на площади вокруг детектора, определяемой длиной пробега нейтрона, с точностью *±4(stat)±8(sys)%*. В перспективе планируется учесть веса для фильтра скользящего среднего, который использовался в работе, и реализовать методику односторонних фильтров для работы в режиме реального времени.

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ “Сеть СКЛ”.

ВЫЯВЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СОЛНЕЧНОВЕТРОВОГО ФАКТОРА НА ОБЕСПЕЧЕНИЕ МЕТАНОМ ВЗРЫВОВ В ШАХТНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Гонсировский Д. Г.

г. Москва, Россия, t.ilatovsky@yandex.ru

В настоящей разработке предлагаются вниманию итоги дальнейшего практического применения ранее опубликованной автором своей методики[1]. Объясняются моменты, когда одной из причин возникновения аварийной ситуации считается космопогодное воздействие. Оно стимулировало формирование (путём десорбции и т. д.) в толще горных пород аномальных скоплений метана и выбросы его в шахтные выработки перед взрывами. На рисунке[2] дано графическое отображение результата применения метода множественной графической корреляции между всплесками интенсивности проявления параметров космопогодных факторов, зафиксированными их временными рядами, и говорящими в пользу вероятной соотносимости с ними проявлениями аварийных ситуаций. *Ряд 1*. Скорость плазмы солнечного ветра – от 296,4 до 471,3 км/с, плотности протонов в ней – от 0,8 до 15,2 протонов в 1 см^3. *Ряд 2*. Значения показателя ММП Bz - от -6,2 до 9,3 нТл. *Ряд 3*. Значения показателя Bz - ниже 0 и до -6,2 нТл. *Ряды 4, 5*. Значения высоты положения в тропосфере Земли поверхности геопотенциала 500 гПа - от 5080 до 5400 м. *Ряды 6, 7*. Значения изобар земной атмосферы - от 990 до 1025 гПа. *Ряд 8*. Метки по времени для взрывов метана. Взрывы наступали после всплесков в солнечном ветре. Показательно, что мощный четвёртый, пятый и шестой взрывы возникали уже при отсутствии людей в шахте (человеческого фактора) и при обесточенной шахте. Подобные ситуации генерирования взрывающегося впоследствии сгустка метана наблюдались в шахтах Распадская и Юаньян (2010 г.), рудника Заполярный (2017 г.), Листвяжная (2021 г.).

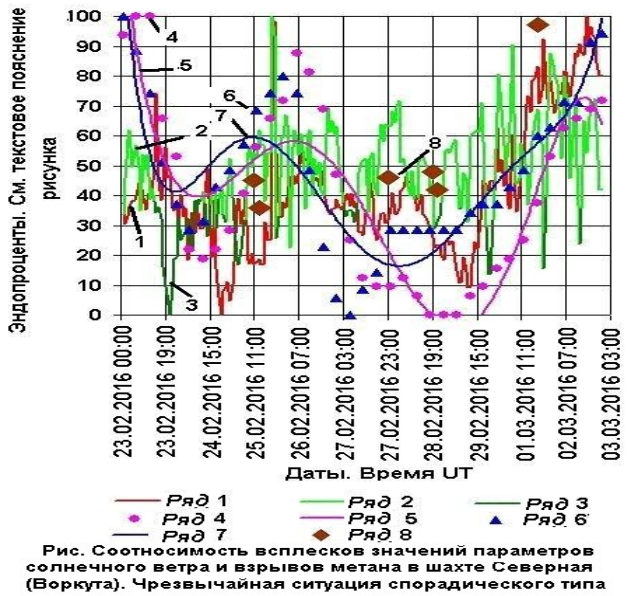


Рис. Соотносимость всплесков значений параметров солнечного ветра и взрывов метана в шахте Северная (Воркута). Чрезвычайная ситуация спорадического типа

[1] **https://www.anchr.ru/wp-content/uploads/2018/01/GENB-3-2017.pdf; https://www.zhiznzemli.ru/images/showcase/pdf/ZhZemli_T39-2_2017.pdf; https://www.zhiznzemli.ru/images/showcase/pdf/ZhZemli_T42-3_2020.pdf; https://www.zhiznzemli.ru/images/showcase/phf/ZhZemli_T43-1_2021.pdf.**

[2] **Эндопроцент – единица измерения, применяемая для документации итогов арифметических операций, при которых разности между текущими значениями членов данного временного ряда и наименьшим его значением делятся на разность между наибольшим и наименьшим значением членов данного временного ряда. Полученные результаты умножаются на сто.**

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫВОДЫ О СООТНОСИМОСТИ НАЧАЛА РАЗВИТИЯ ЯВЛЕНИЯ ТРОПИЧЕСКОГО ЦИКЛОГЕНЕЗА С СОЛНЕЧНОВЕТРОВЫМИ ИНЖЕКЦИЯМИ НА ПОВЕРХНОСТЬ ВОД ОКЕАНОВ

Гонсировский Д. Г.

г. Москва, Россия, t.ilatovsky@yandex.ru

Разрабатываемая автором научная гипотеза о наличии у ряда природных процессов зависимости от космической погоды нуждается в расширении доказательной базы. Сейчас ставилась цель обратить внимание на тропический циклогенез. Свои предшествующие статистические накопления положительных результатов графоаналитического изучения явлений по оставленным ими следам на примере многих сотен сейсмических толчков в Йеллоустоне автор привёл в статье[1]. В ряду с ними стоят фиксации - при наличии активизации солнечноветрового воздействия - пробуждения примерно через 650 лет от «спячки» вулкана Камбальный (24.03.2017 г.) и очередного извержения по той же причине вулкана Ключевской (28.03.2017 г.). Со своей точки зрения, на ином исходном материале и при использовании собственной методики и терминологии проблему космопогодной зависимости некоторых земных процессов решал А.Л. Дунц[2].

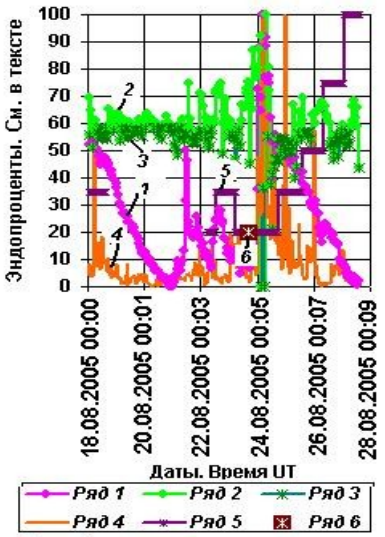


Рис. Соотношения моментов зарождения начальных стадий процесса тропического циклоногенеза и всплесков значений космопогодных параметров (TS Jose, HR Katrina)

Автор доклада изучил вопрос зарождения ураганов и тайфунов, опираясь на 55 случаев возникновения этих моментов в 2005 г. Вероятность истинности выводов высокая. Рисунок – один из примеров. *Ряд 1*. Скорость плазмы солнечного ветра – 352 - 749 км/с, плотность протонов - 0,7 - 33,4 1/см^3. *Ряд 2*. Значения показателя ММП Bz – 18,8 - (-40,9) нТл. *Ряд 3*. Значения показателя ММП Bz - 0 – (-40,9) нТл. *Ряд 4* Авроральная активность 2 – 1285 GW (максимальная в рамках каждого часового периода расчётная мощность излучения, измеренного спутниками NOAA POES 15, 16, 17, 18 у Сев. полюса). *Ряд 5* Стадии тропического циклогенеза. Уровни и даты графика на рисунке: 20 - тропические депрессии (TD); 35 - тропические штормы (TS); 50, 75 и 100 - ураган (HR) (I, II и III категорий соответственно). 18.08 03:00 UT - 18.08 15:00 UT HR Irene, 22.08 16:00 UT - 23.08 15:00 UT TS Jose, 23.08 21:00 UT (1-я “hot tower” - 25.08 04:34 UT) – 27.08 23:00 UT HR Katrina. *Ряд 6*. Срок наблюдения зарождения стадии TD урагана Katrina. Самое интенсивное воздействие солнечноветрового происхождения пришлось на начальный период существования урагана Katrina. В дальнейшем стала преобладать его саморегуляция, при очень вероятной подпитке из космоса (пример – “hot towers” 28.08.2005 г. в 03:24 UT).

[1] https://www.zhiznzemli.ru/images/showcase/pdf/ZhZemli_T42-3_2020.pdf

[2] https://a-dunc.livejournal.com/99342.html; https://www. youtube.com/watch?v=nUMXYsEJaT8

О ВЕРОЯТНОМ УЧАСТИИ ИНЖЕКЦИЙ СОЛНЕЧНОВЕТРОВОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ЛОКАЛЬНЫХ НАРУШЕНИЯХ СТАБИЛЬНОСТИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ СООРУЖЕНИЙ В КРИОЛИТОЗОНЕ

Гонсировский Д. Г.

г. Москва, Россия, t.ilatovsky@yandex.ru

На севере Сибири и Дальнего Востока прогрессирует опасность разрушения многолетнемёрзлых грунтов, находящихся в активной зоне под фундаментами зданий и сооружений. Глобальное осмысление ситуации со ссылкой на изменение климата идёт уже давно. Автор доклада предлагает при практически более ценной конкретизации исследований обратить внимание на такую черту природных условий, как существующую опасность проявления неблагоприятных экзогенных геологических процессов и возникновения особых геоморфологических структур вследствие действия прорывных инжекций в приповерхностную область Земли сгустков отсоединившихся в геомагнитосферу компонент геоэффективного солнечного ветра. Само наличие инжекций подтверждается внимательным изучением оставленных ими следов[1].

Накопленная сумма знаний по данному аспекту позволяет автору доклада, например, особо подходить к рассмотрению причины разрушения грунтов основания фундамента резервуара с топливом на ТЭЦ-3 в Норильске (29.05.2020 г.). Здесь вполне можно предположить, что именно этот участок в ландшафте поразила одна из упомянутых выше инжекций. Тепловая энергия её ухудшила физико-механические свойства не только рыхлых, но и скальных грунтов. Возникшая просадка произошла не от давления сооружения, иначе дно резервуара не оторвалось бы.

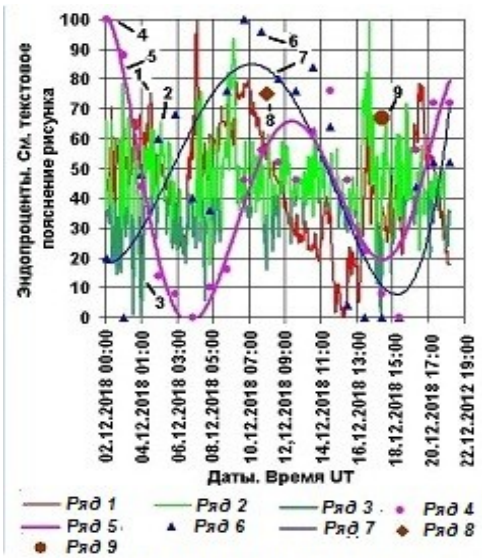


Рис. Графическое отображение проявления элементов физики солнечно-земных связей в обстоятельствах необычного - зимой - и масштабного схода оползня в реку Бурея

Приведенный рисунок объясняет иной механизм разрушения грунтов. Так, в месте контакта инжекции солнечноветрового происхождения с землёй в связке с оползнем возник ещё и взрыв (дуговой разряд плазмы). *Ряд 1*. Скорость плазмы солнечного ветра – 295 - 651км/с, плотность протонов – 0,7 - 14,7 1/ см^3. *Ряд 2*. Значения показателя ММП Bz - 7,3 – (-5,2) нТл. *Ряд 3*. Значения показателя ММП Bz - 0 – (-5,2) нТл. *Ряды 4, 5*. Значения высоты положения в тропосфере Земли поверхности геопотенциала 500 гПа – 4960 - 5460 м. *Ряды 6, 7*. Значения приземных изобар – 1010 - 1035 гПа. *Ряд 8*. Метка по времени для схода оползня (после пика графика для солнечного ветра). *Ряд 9*. Метка по времени для взрыва Камчатского метеорита (или взрыва обволакивавшего его ядро пузыря плазмы, захваченной из попутного солнечного ветра?) (после пика графика для солнечного ветра).

[1] https://a-dunc.livejournal.com/99342.html; ttps://www. youtube.com/watch?v=nUMXYsEJaT8; https://www.windy.com/

Прогноз геоэффективности солнечных активных явлений по современным наблюдательным данным.

В.Н. Ишков

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

По новым наблюдательным данным суммируются наиболее вероятные признаки геоэффективности солнечных активных явлений, как краткосрочном временном интервале (минуты, часы, дни), так и долгосрочном (годы, солнечные циклы, эпохи солнечной активности). Первые определяются динамическими процессами в активных областях (всплытие, развитие и взаимодействие новых и уже существующих магнитных потоков); динамикой крупномасштабного магнитного поля (образование униполярных полей – образование и взаимодействие крупномасштабных магнитных потоков). Вторые, – изменениями фоновых значений общего магнитного поля Солнца, определяющими эпохи солнечной активности и закономерностями развития отдельных солнечных циклов внутри эпох.

В настоящее время сформировалось понимание, что практически все значимые краткосрочные возмущения околоземного космического пространства вызваны исключительно двумя видами солнечных активных явлений:

– **солнечными вспышечными событиями – следствие взаимодействия всплывающих новых магнитных потоков** в пределах АО вне их (**выбросы волокон**), с магнитными полями, в которых они появляются;

– областями в короне Солнца с открытым в межпланетное пространство магнитным полем: **корональные дыры,** из которых в межпланетное пространство выходят высокоскоростные потоки солнечной плазмы.

. Основными агентами, переносящие возмущения от солнечных вспышечных событий в короне Солнца и в межпланетном пространстве, являются:

– **корональные выбросы вещества,** одного из основных составляющих солнечного вспышечного события;

– **высокоскоростные потоки** солнечного ветра от КД с повышенными значениями магнитного поля, плотности, температуры, которые в межпланетном пространстве, взаимодействуя, с уже существующими структурами солнечного ветра, воздействуют на магнитосферу, вызывая возмущения всех составляющих ОКП.

Понимание данных явлений позволяет с хорошей точностью прогнозировать солнечные геоэффективные явления, как на Солнце, так и их последствия для ОКП.

В настоящее время на основе достоверных солнечных циклов удалось понять, что солнечная активность разбивается на эпохи "повышенной" и "пониженной" СА по 5 солнечных циклов, которые разделяют переходные периоды (1.5СЦ). В эти эпохи полностью меняется картина пятнообразовательной активности за счёт изменения уровня средней величины общего магнитного поля Солнца. Количество солнечных активных явлений и их проявлений в ОКП во всех трёх классах возмущений (R, S и G) для каждой эпохи разная, что позволяет дать долгосрочный прогноз общего хода развития и особенностей отдельных солнечных циклов внутри эпох солнечной активности.

Текущий 25 солнечный цикл стал вторым солнечным циклом второй эпохи пониженной СА, которая продлится ещё 3 СЦ которые будут циклами средней (25, 27) и низкой (26, 28) величины.

Среднесрочный прогноз солнечной активности по ежедневным данным

Т.Л. Гуляева, Р.А. Гуляев
gulyaeva@izmiran.ru

Разработана модель прогноза солнечной активности на 45 дней (MSA45) для использования с ионосферной моделью в реальном времени. Модель основана на подобии данных в текущей фазе четного/нечетного солнечного цикла с данными в аналогичной фазе предыдущего четного/нечетного солнечного цикла. Модель протестирована по данным ряда чисел солнечных пятен SSN2 и потока солнечного радиоизлучения F10.7. Сравнение модели MSA45 с прогнозом USAF-45DF индекса F10.7 и с наблюдательными данными показало улучшение точности прогноза на 20%.
Работа выполнена при поддержке совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-52-250001_Кипр_а, и Национального исследовательского фонда Кипра RPF Bilateral/Russia(RFBR)1118/0004 (RENAM).

Геоинформационная система для прогнозирования полярных сияний

Воробьев А.В[1,2], Соловьев А.А.[1,3], Пилипенко В.А.[1,3], Воробьева Г.Р.[2]

[1]ГЦ РАН, г. Москва, Россия; [2]УГАТУ, г. Уфа, Россия; [3]ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, gulnara.vorobeva@gmail.com

Реализуется подход к созданию интерактивной компьютерной модели краткосрочного прогноза интенсивности полярных сияний в оптическом диапазоне в виде веб-ориентированной геоинформационной системы. В качестве базового математического обеспечения в работе используется эмпирическая модель OVATION Prime [1], согласно которой на вход системы принимаются данные о состоянии параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля, регистрируемые в первой точке Лагранжа. На выходе модель возвращает данные в JSON- и CSV-форматах, определяющие характер пространственного распределения как непосредственно интенсивности полярных сияний в оптическом диапазоне, так и ряда сопутствующих геофизических величин (проводимость ионосферы, энергия потока заряженных частиц и пр.). Визуализация данных осуществляется на базе технологии «виртуальный глобус» и предоставляется конечному пользователю в виде специализированного веб-сервиса [2]. Верификация прогноза осуществляется путем сравнения результатов моделирования с данными all-sky-камер, представленных отдельным слоем и ведущих наблюдение полярных сияний в оптическом диапазоне в режиме реального времени. Помимо визуализации, разработанный сервис также предоставляет набор инструментов для пространственного и статистического анализа контролируемых параметров.

1. Newell, P. T., K. Liou, Y. Zhang, T. Sotirelis, L. J. Paxton, and E. J. Mitchell (2014), OVATION Prime-2013: Extension of auroral precipitation model to higher disturbance levels, Space Weather, 12, 368–379, doi:10.1002/2014SW001056.
2. Vorobev A. V., V. A. Pilipenko, R. I. Krasnoperov, G. R. Vorobeva, D. A. Lorentzen (2020), Short-term forecast of the auroral oval position on the basis of the ``virtual globe'' technology, Russ. J. Earth Sci., 20, ES6001, doi:10.2205/2020ES000721.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА ВРЕМЕНИ И СКОРОСТИ ПРИХОДА КВМ К ЗЕМЛЕ В 2014-2016 ГОДАХ И АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ СОБЫТИЙ

Капорцева К.Б., Еремеев В.Е., Шугай Ю.С., Калегаев В.В.

НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, kb.kaportceva@physics.msu.ru

С помощью разработанного ранее метода [1,2] моделирования времени и скорости прихода на орбиту Земли корональных выбросов масс (КВМ), зарегистрированных с помощью коронографа LASCO, были спрогнозированы и проанализированы события прихода на околоземную орбиту межпланетных КВМ (МКВМ) для 2014 – 2016 годов. Предлагаемый метод прогнозирования представляет собой комбинацию DBM-модели [3], которая определяет закон движения выброса в фоновом ветре, и модели прогноза высокоскоростных потоков (ВСП) солнечного ветра [4], которая позволяет рассчитать скорость фонового солнечного ветра в любой точке гелиосферы на основе расчета площадей корональных дыр по изображениям Солнца, полученным с космической обсерватории SDO/AIA.

Предлагаемый метод отбора геоэффективных событий позволяет предварительно отсеять КВМ с вероятно низкой геоэффективностью. Метод включает в себя ряд фильтров, основанных на угловых параметрах КВМ и пространственных параметрах связанного с КВМ димминга, указывающего на наличие источника КВМ на видимой стороне Солнца. В частности, используется долготный фильтр, предложенный в работе [5], согласно которой долгота корональных источников значительной части геоэффективных КВМ лежит в интервале [40E,75W] на Солнечном диске.

Результаты прогноза показывают высокую вероятность прогноза КВМ, повлекших за собой сильные геомагнитные возмущения (падение Dst индекса более -100 нТл) для 2014 – 2015 годов. Сравнение результатов прогноза в 2014-2015 годах с периодом спада солнечной активности в 2016 году позволяет сделать предположение о том, что на спаде цикла солнечной активности следует использовать другой метод отбора геоэффективных событий КВМ для повышения качества прогноза.

1. Kaportseva, K.B., Shugay, Y.S.// Cosmic Res. 2021. V. **59.** P. 268.
2. Shugay, Y.S., Kaportseva, K.B.// Geomagn. Aeron. 2021. V. **61.** P. 158.
3. Vrsnak B., Zic. T, Vrbaneck D., et al. // Solar Physics. 2013. V. **285**. P. 295.
4. Shugay Yu., Slemzin V., Rodkin D., et al. // Space Weather Space Clim. 2018. V. **8**. P. A28.
5. Wang, Y., Shen, C., Wang, S. et al. // Solar Physics.2004. V. **222.** P. 329.

ОЦЕНКА ИНДЕКСА F10.7 ПО ДАННЫМ МОЩНОСТИ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА В МЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН В ПЕРИОД МИНИМУМА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Филиппов М.Ю., Строев А.К., Ходатаев Н.А., Емельянова А.И.

АО РТИ, г. Москва, Россия, mfilippov@rti-mints.ru

Индекс солнечной активности F10.7 широко используется в научных и прикладных задачах. Индекс F10.7 определяется как среднесуточная спектральная плотность потока солнечного радиоизлучения на длине волны порядка $\lambda \sim 10.7$ см. В работе представлен опыт определения индекса F10.7 на основе данных измерения мощности радиоизлучения Солнца в метровом диапазоне, на длине волны $\lambda \sim 190$ см. Назовём его, в этой работе, для определенности, индекс F190.

Известно, что вариации потока радиоизлучения в метровом диапазоне подвержены возмущениям – шумовым бурям, и для получения лучшей связи F190 с вариациями интегральной солнечной активности, было предложено дополнительно усреднять его с инерционным весовым окном. На наборе данных 2017-2018 года было показано [1] что между индексом F10.7 и рассчитанным F190 коэффициент корреляции составляет порядка 0.75, и для некоторых прикладных задач вместо индекса F10.7 может быть использован индекс F190. В настоящем докладе представлены данные за 2019-2020 год, которые в целом подтвердили предыдущие оценки эффективности метода.

1. Flippov M. Yu, Abunin A. A. Khodataev N. A. // Geom. and Aeronomy 2019. V. **59.** P. 950.

КОМПЛЕКСНАЯ ПЛАТФОРМА КОНТРОЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ В АРКТИКЕ

Зайцев А.Н., Петров В.Г., Канониди К.Х.

ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, alex.zaitsev1940@mail.ru

Развитие наземных сетей наблюдений состояния околоземного космического пространства остается среди приоритетных задач на ближайшие годы. Базой развития становятся цифровые технологии и искусственный интеллект. На основе новых прорывных результатов предложена комплексная платформа контроля космической погоды в Арктике. В основе платформы – набор датчиков, система регистрации данных, система передачи данных и система автономной работы.

Набор датчиков включает : магнитометр, ГЛОНАС – приемник, ОНЧ-приемник, риометр, метео-атомат, и дополнительный внешний интерфейс. Опыт создания автономных платформ с набором геофизических датчиков был получен при реализации проекта «Геофизический полигон в Антарктиде», 1974 - 1994. С развитием приборов на базе микропроцессоров появилась возможность реализации платформ с более надежными системами регистрации и передачи данных по сотовой сети связи. Такие эксперименты нами были выполнены в 2013 – 2015 гг. на Ямале и в настоящее время ведется проработка наиболее простых и доступных решений (1).

Магнитометры являются как бы опорной частью платформы вокруг которой формируется весь остальной набор датчиков. В настоящее время появились разработки индукционных магнитометров заменивших феррозондовые или резистивные. По риометрам шаг вперед был сделан по мере создания многолучевых антенных систем, с аналоговой коммутацией измеряемых сигналов с помощью матрицы Батлера, т.н. «отображающие риометры» (2). Недавно было предложено использовать цифровые системы на основе Фурье-интерферометрии и тем самым обеспечить многолучевость антенной системы.

Навигационные приемники ГЛОНАСС имеют цифровые анализаторы сигналов позволяющие сразу перейти к оценке параметров ионосферы и построению томографических изображений. Приемники ОНЧ-сигналов подтверждают воздействие солнечных излучений в реальном времени. Таким образом набор наземных геофизических датчиков позволяет реализовать комплексную оценку состояния космической среды по принципу «здесь и сейчас».

По мере создания платформ контроля космической погоды и размещения их в областях критического воздействия – зоны полярных сияний и околополюсных площадей – создаются условия реализации независимого контроля окружающей среды, в том числе в Арктике (3).

1. Зайцев А.Н., Канониди К.Х., Петров В.Г., Гамза Е.И., Петрукович А.А., Состояние и перспективы развития проекта «Геомагнитный меридиан 145», Материалы 13-ой международной школы-конференции «Проблемы геокосмоса» (24-27 марта 2021 г., Санкт-Петербург, Россия, стр. 342 – 355, https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46263083, Труды конференции **geo.phys.spbu.ru**, раздел **Geocosmos2020_proceedings.pdf**
2. Зайцев А.Н., Амиантов А.С., Петров В.Г., Исследование динамики слоя D ионосферы методом сканирующего риометра, 10-я конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», М., ИКИ РАН, 2012, http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=27&thesis=3162
3. Зайцев А.Н., Канониди Х.Д., Петров В.Г., Перспективы развития геофизического полигона на Ямале, конф. «Гелиогеофизические исследования в Арктике», ПГИ, Мурманск, с. 43-46, 2018, **DOI: 10.25702/KSC.978-5-91137-381-8.43-46**
http://pgia.ru/lang/ru/conf/gelio/gelio_in_arctic2018

МОДЕЛЬ ПОТОКОВ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОРБИТАХ ГЛОНАСС

Шустов П.И. , Петрукович, А.А., Артемьев А.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, p.shustov@gmail.com

В рамках данной работы исследуется возможность построения эмпирической вероятностной модели потоков высокоэнергичных электронов на высотах орбиты ГЛОНАСС. Основой данной эмпирической модели является статистика наблюдений за 2012–2019 года потоков электронов на спутниках космической миссии Radiation Belt Storm Probes. При этом измеряемые потоки проецируются вдоль силовых линий магнитного поля Земли на исследуемую высоту, в рассматриваемом случае – высоту орбиты спутников ГЛОНАСС. Проецирование осуществляется с помощью эмпирической модели магнитного поля Земли, параметрами которых являются геомагнитные индексы (например, индекс SymH).

Дальнейший анализ спроецированных на исследуемую высоту потоков электронов позволяет получить функции вероятности амплитуд потоков в зависимости от энергий и от геомагнитных индексов. В работе представлены аналитические аппроксимации данных функций вероятностей. Отдельно рассмотрен вопрос использования разработанной модели для прогноза интегральных потоков за отведённый интервал нахождения спутников на орбите.

МОНИТОРИНГ РАДИАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА НА СПУТНИКЕ «АРКТИКА М1»

В.И. Оседло[1], В.В. Калегаев[1,2], О.И. Абанин[1], В.О. Баринова[1], Н.А. Власова[1], Н.Н. Павлов[1], И.А. Рубинштейн[1], В.И. Тулупов[1], А.А. Шемухин[1], В.И.Денисова[3], А.Ю.Репин[3]

1 МГУ им. М.В. Ломоносова, НИИЯФ, Москва, Россия, klg@dec1.sinp.msu.ru
2 МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия
3 ИПГ им. Е.К.Федорова, Москва, Россия

В течение ряда лет НИИЯФ МГУ в сотрудничестве с ИПГ Росгидромета осуществляет мониторинговые наблюдения потоков энергичных частиц и магнитосферной плазмы в околоземном пространстве. Измерения осуществляются на орбитах с широким диапазоном высот: полярные спутники серии «Метеор» (~850 км) и геостационарные аппараты серии «Электро» (~36 тыс. км). Данные космических аппаратов используются для диагностики радиационного состояния околоземного космического пространства Центрами космической погоды в ИПГ и НИИЯФ МГУ.

Новым шагом в развитии системы радиационного мониторинга стал запуск спутника «Арктика М1» на эллиптическую орбиту с высотами апогея и перигея ~39 тыс. км и ~600 км. На спутнике установлен комплекс приборов ГГАК с приборами, ГАЛС (ИПГ) и СКИФ (НИИЯФ МГУ) для измерений потоков, энергетических спектров, временных вариаций и углового распределения протонов и электронов РПЗ, частиц СКЛ от солнечных вспышек при их совокупном воздействии.

Прибор СКИФ идентичен аналогичным приборам установленным на современных спутниках «Метеор М2» и «Электро Л». Он обеспечивает измерения спектров протонов и электронов в диапазонах энергий 2 - 160 МэВ, 0.15 – 10 МэВ соответственно (спектрометр энергичной радиации - модуль СЭР прибора СКИФ), а также измерения спектров низкоэнергичных электронов и протонов в диапазоне энергий 0.05 - 20 кэВ (электростатические анализаторы электронов и протонов (ЭСА) - модули СГМТД-Э и СГМТД-П). Получение большого объема регулярных мониторинговых данных о радиационной обстановке в ОКП на базе многоярусных измерений позволяет изучать ее кратко- и средневременную динамику, ее связь с солнечной активностью, является необходимым условием для восстановления трехмерной динамической картины радиации в магнитосфере.

Воздействие солнечного ветра на магнитосферу: неизменность соотношений между электрическим полем солнечного ветра Ekl, индексом PC и индексами магнитных возмущений AL и Dst в период с 1997 по 2020 гг.

О.А.Трошичев, С.А.Долгачёва, Д.А.Сормаков

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

Соотношения между электрическим полем солнечного ветра E_{KL}, индексом магнитной активности в полярной шапке *PC* и индексами магнитной активности *AL* и *Dst* определяются калибровочными коэффициентами (***α, β, φ***), характеризующими линейную связь между указанными параметрами. Эти коэффициенты были рассчитанные по данным магнитных наблюдений и измерениям параметров солнечного ветра за 1995-2005 годы [1], и затем использовались при расчёте *PC* индекса в 2006-2020гг [2-5]. Стабильность соотношений между параметрами E_{KL}, *PC* и *AL*, *Dst* в ходе 23 и 24 циклов солнечной активности оценивалась по величине корреляции между суточными значениями этих параметров за период с 1997г. по 2020г. Результаты анализа свидетельствуют о том, что средний уровень корреляции между полем E_{KL} и *PC* индексом оставался в пределах R=0.85-0.90 в течение 24 лет; при этом корреляция снижалась до величины R=0.75 на фазе максимума солнечной активности (2008г. и 2015г.). Этот эффект связан с солнечными протонными событиями (SPE), во время которых в полярные области вторгаются потоки высокоэнергичных солнечных протонов, что приводит к резкому увеличению проводимости полрной ионосферы и, как следствие, к нарушению регулярных соотношений между соответствующими величинами E_{KL} и *PC*. В то же время, *AL* индекс показывал неизменно высокую корреляцию с *PC* индексом (R=0.93) и с полем E_{KL} field (R=0.83) в ходе обоих циклов солнечной активности. Корреляция суточных величин *Dst* индекса с величинами *PC* и E_{KL} была также стабильной, но более низкой е (R=0.72 и 0.64, соответственно). Годовой ход *PCN* и *PCS* индексов демонстрирует явную сезонную вариацию: величина *PC* индекса в летней полярной шапке (*PCsummer*) всегда больше, чем величина индекса в зимней шапке (*PCwinter*), независимо от полушария и солнечной активности. Выбор *PCsummer* индекса или *PCwinter* индекса для использования в практической работе определяется поставленными задачами: при мониторинге магнитосферных суббурь следует использовать индекс *PCwin*, при мониторинге геоэффективности солнечного ветра (поля E_{KL}) лучше использовать индекс *PCsummer* или индекс *PCmean=(PCwin+PCsum)/2* index). На основании проведённого анализа сделан вывод, что соотношения между полем E_{KL}, индексом *PC* и индикаторами магнитосферной возмущённости *AL* и *Dst* оставались неизменными в ходе 23 и 24 циклов солнечной активности, что свидетедьствует о независимости калибровочных коэффициентов, определяющих эти соотношения, от уровня солнечной активности.

1. Troshichev O.A., N. A. Podorozhkina and A. S. Janzhura // *Ann Geophys* 2011, 29, 1479–1489.
2. Troshichev O.A., Podorozhkina N.A., Sormakov D.A., Janzhura A.S. // *J Geophys Res Space Phys,* 2014, 119.
3. Troshichev O.A., Sormakov D.A. // *Earth Planets Space,* 2015, 67: 170.
4. Troshichev O.A., Sormakov D.A. // *J Atmos Solar- Terr. Phys,* 2018, 180: 60–77.
5. Troshichev O.A., Dolgacheva. S.A., Stepanov N.A., Sormakov D.A. // *J Geophys Res Space Phys,* 2021, 126.

ПАРАМЕТРЫ ВЫСОКОШИРОТНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ДВУХ ПОЛУШАРИЯХ

Ягова Н. В., Козырева О. В, Пилипенко В. А., Федоров Е. Н., Мартинес-Беденко В. А.

ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, kozyreva@ifz.ru

Индексы геомагнитной и авроральной активности в южном полушарии не только дополняют используемые в настоящее время индексы северного полушария, но и создают дополнительные возможности по анализу эффектов асимметрии, связанных с ионосферными условиями, включая разные географические широты при тех же геомагнитных в двух полушариях, сезонную асимметрию и асимметрию высыпаний частиц, имеющую разную природу в каспе и авроральном овале. Кроме того, разный уровень геоэлектрической неоднородности на номинально сопряженных станциях позволяет разделить вклады магнитосферно-ионосферной и геоэлектрической составляющей.

Представлены результаты анализа как отдельных геомагнитных возмущений, так и их проявления в индексах геомагнитной активности, для высоких широт в двух полушариях от авроральной овала до полярной шапки. Показано, что в зависимости от географического расположения, сезона, типа возмущения и фона, на котором оно развивается, использование индексов одного полушария, может привносить разную погрешность. В ряде случаях она может быть исправлена введением близкого к 1 поправочного коэффициента, но существуют возмущения, которые качественно отличаются для номинально сопряженных позиций.

Отношения амплитуд по данным измерений в двух полушариях сравниваются с результатами модели [1].

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, проект № 20-05-00787.

1. Pilipenko V. A. et al. // Journ. Geophys. Res.: Space Phys. 2019. V. 124. 10.1029/2018JA026030

ДИНАМИКА АВРОРАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ РАДИОВОЛН, ВЫЗВАННОГО ЕДИНИЧНОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ

Шухтина М.А.[(1)], Сергеев В.А.[(1)], Николаев А.В.[(2)], Рогов Д.Д.[(2)]

(1) Санкт-Петербургский Государственный Университет, г.Санкт-Петербург, Россия, maria-shukht@yandex.ru

(2) ААНИИ, г. Санкт-Петербург, Россия

Высыпания энергичных электронов с энергиями 30-300 кэВ оказывают влияние на космическую погоду, в частности, вызывая авроральное поглощение радиоволн и влияя на содержание озона. Так как авроральное поглощение тесно связано с суббурями, можно предположить, что механизм ускорения заложен в самой природе суббури. Мы показали, что, действительно, амплитуда поглощения тесно связана с параметрами токового клина суббури и с приращением MPB-индекса – среднеширотного индекса суббури [1], т.е. с диполизацией магнитного поля. На этом основании мы представляем отклик аврорального поглощения на суббурю как суперпозицию откликов (или линейных фильтров) на элементарную инжекцию, связанную с диполизацией (приращением $(MPB)^{1/2}$). Поиск этого отклика и является целью работы.

Мы предполагаем, что поглощение вызывается высыпанием частиц из электронного облака, вторгающегося в магнитосферу в районе полуночи и дрейфующего на восток, поэтому функции отклика явно зависят от местного магнитного времени. Мы также опираемся на ранее полученные данные [2], согласно которым отклик на изолированную суббурю составляет 3-4 часа. Таким образом для каждого сектора MLT решается система линейных уравнений $A_i = \sum F_k T_{ik}$, *где* T_{ik} – ряд приращений величины $(MPB)^{1/2}$, а F_k – искомая функция отклика. При решении системы использовались 5-минутные медианы данных риометров канадского полигона NORSTAR (https://data-portal.phys.ucalgary.ca/go_rio/) и 5-минутные средние значения MPB-индекса.

В результате были найдены фильтры для изолированных суббурь для центра авроральной зоны ($Ф'$~66-67^0). Вид этих фильтров соответствует представлению о дрейфующем электронном облаке и подтверждает ранее найденные морфологические черты суббури в поглощении. Форма фильтров близка к форме медианного поглощения, полученного методом наложения эпох, хотя несколько более сжата по времени, т.к. суббуря, как правило, состоит из нескольких инжекций.

Однако изолированные суббури встречаются редко, существенно больший интерес представляют возмущенные интервалы с множеством суббурь. Были построены функции отклика для таких интервалов для цепочки Churchill line, простирающейся от 60^0 до 73^0. Полученные фильтры оказались близки к полученным ранее, хотя центр зоны сместился с $Ф'$~66.5^0 на $Ф'$~64^0, причем метод наложения эпох в этом случае неприменим.

Работа поддержана грантом РНФ № 22-27-00169.

1. McPherron, R. L., Chu, X. // Space Sci. Rev. 2017. V. **206.** P. 91.
2. Berkey, F. T., et al.// Planet. Space Sci. 1974. V. **22**. P. 255.

ОСОБЕННОСТИ ВОЗРАСТАНИЙ ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ МАГНИТОСФЕРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ С ЭНЕРГИЕЙ >2 МэВ НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ, ВЫЗВАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Абунина М.А., Шлык Н. С., Белов А.В., Абунин А.А.

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

В работе исследуются возрастания потоков магнитосферных электронов и сопутствующие явления в 2009 году, который был очень спокойным. Однако регистрировались возрастания высокоэнергичных магнитосферных электронов, которые были разделены по группам в зависимости от максимального потока: (1) >500 ч/см^2*с*ср, (2) от 100 до 500 ч/см^2*с*ср, (3) от 10 до 100 ч/см^2*с*ср, (4) < 10 ч/см^2*с*ср. В работе анализируется связь выделенных возрастаний с особенностями межпланетных и геомагнитных возмущений, а также с их солнечными источниками. Подробно рассматривается связь с отдельными характеристиками корональных дыр. Показано, что максимальный поток высокоэнергичных магнитосферных электронов имеет слабую корреляцию как с площадью корональных дыр, так и с их магнитным потоком. Наилучшие связи обнаружены со скоростью высокоскоростного потока и сопутствующей геомагнитной активностью.



Рис. Поведение потока магнитосферных электронов в 2009 г. по данным спутника GOES.

О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ ЧАСТИЧНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТОКА ПО ДАННЫМ СЕТИ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ РОССИИ

Бикташ Л.З. 1, Зайцев А.Н. 1,2 1 ИЗМИРАН, Москва, lilia_biktash@mail.ru , 2 ИКИ РАН, Москва

В настоящее время огромная сеть солнечных, магнитных и ионосферных обсерваторий и космических аппаратов, бороздящих гелиосферу и магнитосферу, помогают решать сложную проблему солнечно-земных связей. Тем не менее, наземные солнечные, магнитные и ионосферные наблюдения остаются базовыми в этих исследованиях. Именно по мере накопления сведений о магнитных вариациях постепенно выяснялись многообразные связи, существующие между вариациями земного магнитного поля и физическими процессами, происходящими на Солнце и в верхних слоях земной атмосферы. По данным магнитных обсерваторий вычисляют различные геомагнитные индексы: AE, Кр, Dst и другие индексы. Необходимость в различных индексах объясняется тем, что в зависимости от широты нашей планеты компоненты магнитного поля разительно отличается и зависит от электрических токов в ионосфере и магнитосфере, которые и формируют эти вариации. По мере накопления данных возникает небходимость уточнения существующих индексов и создание новых геомагнитных индексов. Так, финскими исследователями был предложен скорректированный Dst – Dcx индекс (Hakkinen et al, Mursula). Многочисленная сеть SuperMAG магнитометров позволила создать новые, уточненные версии AE и Dst индексов. Предложен SMR индекс, который вычисляется по методике расчета Dst индекса. Частичный кольцевой ток определяется для четырех MLT секторов, а симметричный индекс вычисляется как средняя величина по этим секторам SMR = SMR00 + SMR06 + SMR12 + SMR18⁄4 (Bergin, Chapman, Gjerloev). Расчет Dst индекса для двух магнитных бурь по данным российских геоманитных станций проведен Мочаловым и Мочаловой. Мы также проанализировали возможность использования российских геомагнитных станций для вычисления аналога Dst-индекса (Бикташ, Зайцев). Поскольку Россия занимает огромную территорию и несколько часовых поясов, мы предлагаем определять частичный кольцевой ток для двух 6 часовых секторов местного времени. Таким образом, цель нашей работы заключается в организации системы контроля кольцевого тока по данным магнитных обсерваторий России.

НАБЛЮДЕНИЯ СКОРОСТИ ПОДЪЕМА ЭРУПТИВНЫХ ВОЛОКОН

Березин И.А., Златов А.Г.

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

Хорошо известно, что многие корональные выбросы массы связаны с эрупцией волокон и протуберанцев. Однако наблюдения лучевых скоростей эруптивных волокон редки и предоставляют ограниченную информацию. В настоящей работе представлен анализ лучевых скоростей ряда эруптивных волокон, наблюдавшихся в 2017-2021 гг. на Кисловодской Горной Астрономической Станции. Анализ основан на данных измерений патрульного оптического телескопа-спектрогелиографа в линии Н-альфа, ведущего непрерывные наблюдения полного диска Солнца со временем сканирования диска около одной минуты. По результатам наблюдений были восстановлены средние лучевые скорости восьми эруптивных волокон и прослежена их эволюция за несколько часов до извержения. Полученные характерные скорости рассмотренных волокон составляют 1-3 км/с. В докладе также обсуждается возможность использования патрульного телескопа для мониторинга предвестников извержения волокон.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 1021032422589-5.

ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОРБИТАЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ. РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ.

Климов С.И.[1], Грушин В.А.[1], Долгоносов М.С.[1], Зелёный Л.М.[1], Новиков Д.И.[1], Осадчая Л.А.[1], Петрукович А.А.[1], Лихтенбергер Я.[2]

[1] *Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия,* sklimov@iki.rssi.ru
[2] *Университет Ётвёша, г. Будапешт, Венгрия*

Эксперимент «Обстановка (1 этап)» на Российском сегменте МКС засвидетельствовал [1] в режиме мониторинга наличие широкополосных (0,1 – 23 кГц) электромагнитных излучений в различных областях ионосферы. Стабильная по высоте и наклонению орбита, способствует выделению из долговременных измерений компоненты геофизического происхождения на различных L-оболочках магнитного поля Земли. Долговременные ряды физических параметров дают возможность эффективно продвигаться, в частности, в следующих направлениях:

– организация долгосрочного экологического электромагнитного мониторинга возмущений в окружающей среде по программам фундаментальных исследований солнечно-земных связей, особенно в наиболее активной области ионосферы – F2 слое;

– создание базы экспериментальных плазменно-волновых данных по состоянию ионосферы Земли для выявления и предотвращения ее катастрофических изменений.

В настоящее время ГК Роскосмос ориентируется на новую Российскую национальную орбитальную служебную станцию РОСС [2], имеющую более высокое, чем МКС (~52 град), наклонение орбиты, что будет способствовать охвату всей территории России, включая полярные области.

Опыт экспериментов на РС МКС [3] свидетельствует, что эффективность мониторинга ионосферных электромагнитных излучений повышается при параллельной реализации, под эгидой ГК Роскосмос, научно-образовательной программы типа ИНСПИРЕ [4, 5] так же, как ИНСПИРЕ под эгидой НАСА.

[1] Климов С.И., В.А. Грушин и др. Исследования в ионосфере электромагнитных параметров космической погоды в эксперименте «*Обстановка (1 этап)*» на Российском сегменте МКС. Космическая техника и технологии № 1(32)/2021, стр. 20-41. DOI 10.33950/spacetech-2308-7625-2021-1-20-41 .

[2] Российская национальная орбитальная служебная станция (РОСС). "Наука и техника" https://naukatehnika.com/rossijskaya-kosmicheskaya-stanciya-ross.html?noredir=true

[3] Климов, С.И., О.Л. Вайсберг, В.А. Грушин, Л.М. Зелёный, и др. Трёхуровневый научно-образовательный эксперимент в магнитосфере. ПЕРВАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО КОСМИЧЕСКОМУ ОБРАЗОВАНИЮ «ДОРОГА В КОСМОС», Москва, 5–8 октября 2021 года, стр. 121-125.

[4] Taylor, B., S. Klimov, B. Pine. INTMINS - November / 95 operation schedule. The INSPIRE Journal, v.4, No.1, p.5-11, 1995.

[5] Долгоносов, М.С., Л.М. Зелёный и др. Перспективы исследований высокоэнергичных процессов в атмосфере земли: «Чибис-АИ» и «Обстановка 2.1». *Одиннадцатая ежегодная конференция* «Физика плазмы в солнечной системе» *15-19 февраля 2016г., ИКИ РАН,* Сборник тезисов, с. 204.

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО ДЕТЕКТОРА МОЛНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННЫХ ЯВЛЕНИЙ.

Филатов А.Л.

ФИРЭ РАН, г. Фрязино, Россия, 0111111@mail.ru

В последние годы активно проводятся исследования влияния молниевой активности на процессы в атмосфере Земли и околоземном пространстве [1]. Первоначально детекторы молний устанавливались на низкоорбитальных спутниках. В 2017 году NASA используя размещенную на спутнике GOES-16 систему GLM (Geostationary Lightning Mapper) впервые получило мгновенную карту молний западного полушария [2]. Филиал АО "РКЦ "Прогресс" - НПП "ОПТЭКС" в настоящее время разрабатывает аналогичный отечественный геостационарный детектор молний [3].

Всемирная метеорологическая организация и Глобальная система наблюдений за климатом объявили молнии важной климатической переменной для изучения изменений климата. Для ускорения процесса обработки огромного массива данных, полученных с использованием GLM, в публикациях, поддерживаемых Американским геофизическим союзом AGU [4], описывается, где эти данные выложены и стандартные схемы их обработки. В представленной работе впервые предложен и опробован алгоритм исследования резонанса Шумана [5] с использованием данных GLM, которые выложены в открытый доступ.

Кроме того, предложены технические решения, которые позволят применять GLM не только для климатологического анализа, но и для исследования плазменных явлений. Они построены на технологии использования в GLM акустооптических фильтров, которая впервые было предложено в [6]. В текущей и проектируемой [3] конструкциях GLM используется интерференционный узкополосный светофильтр ≈2 нм. для пропускания самого яркого триплета молнии с длинами волн 777,19 нм; 777,42 нм; 777,54 нм. Недавно проведенные исследования многополосной акустооптической фильтрации [7] показали, что возможно одновременно сформировать несколько полос пропускания с шириной ≈2 нм. Таким образом, можно выделить все основные спектральные пики излучения молний из фонового излучения освещаемых солнцем облаков.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

1. Earle R. Williams // Science 1992, New Series, V. 256, No. 5060, P. 1184

2. https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/flashy-first-images-arrive-from-noaa-s-goes-16-lightning-mapper

3. Квитка В.Е., Дюльдин Р.С., Клюшников М.В., Прасолов В.О. // Материалы 17-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 2019 , М., ИКИ РАН, с. 140

4. Eric et al, // Journal of Geophysical Research: Atmospheres 2019 V. 124, I. 24, P. 14285

5. Sentman, D.D., Schumann Resonances, in: Handbook of Atmospheric Electrodynamics, V. 1, H. Volland,Editor, CRC Press, Boca Raton, USA, 1995, P. 267

6. Филатов А.Л., Яременко Н.Г., Карачевцева М.В., // Материалы 18-й Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» 2020, М., ИКИ РАН, с. 128

7. Филатов А.Л. // Письма в ЖТФ, 2021, том 47, вып. 1 с. 20

ПОДХОД К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ И ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ГЕОИНДЦУИРОВАННЫХ ТОКОВ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Воробьев А.В[1,2], Соловьев А.А.[1,3], Пилипенко В.А.[1,3], Воробьева Г.Р.[2]

[1]ГЦ РАН, г. Москва, Россия; [2]УГАТУ, г. Уфа, Россия; [3]ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, geomagnet@list.ru

На основе методов машинного обучения и искусственных нейронных сетей разрабатывается подход к диагностированию и прогнозированию геоиндуцированных токов (ГИТ). Исследуются и анализируются временные ряды источников исходных данных. Методом статистического и корреляционного анализа производится отбор и ранжирование признаков [1], на базе которых формируются модели, обеспечивающие диагностику ГИТ [2] со среднеквадратической ошибкой (СКО) ~0.12 $А^2$. Затем путем подстановки в полученные диагностические модели прогнозных значений признаковых объектов, вычисленных на основе ARIMA-моделей, осуществляется краткосрочный (15 мин) прогноз ГИТ. Расчетное значение СКО значений прогноза признаковых объектов и ГИТ на севере Кольского п-ова составляет ~0.24 $(нТл/мин)^2$ и ~0.81 $А^2$ соответственно. Разработанные модели интегрируются в структуру системы ППР, призванной повысить уровень техносферной безопасности в высокоширотных регионах Российской Федерации.

1. Vorobev A. V., Pilipenko V. A. Geomagnetic data recovery approach based on the concept of digital twins // Solnechno-Zemnaya Fizika . 2021. no. 2. pp. 53-62. DOI: https://doi.org/10.12737/szf-72202105 (Date of access 19.10.2021).
2. Vorobev A. V., Pilipenko V. A., Sakharov Y. A., Selivanov V. N. Statistical relationships between variations of the geomagnetic field, auroral electrojet, and geomagnetically induced currents // Solnechno-Zemnaya Fizika . 2019. no. 1. pp. 48-58. DOI: https://doi.org/10.12737/szf-51201905 (Date of access 19.10.2021).

ДОЛГОСРОЧНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧИСЛА СОЛНЕЧНЫХ ПЯТЕН НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Крашенинников И.В., Чумаков С.О.

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

Долгосрочный прогноз солнечной активности является одним из важнейших параметров космической погоды. Как ключевой управляющий индекс, прогнозные данные солнечной активности (СА) в виде числа солнечных пятен (solar spot number – SSN) и потока солнечного радиоизлучения (solar radio flux – F10.7), входят в прогностические ионосферные модели, на основе которых, в частности, формируется планирование работы ионосферных радиотехнических систем. Традиционно требуемый долгосрочный прогноз условий прохождения радиоволн охватывает временной интервал от одного месяца до 2-3 лет вперед.

В настоящее время есть два базовых источника прогнозных значений для параметров солнечной активности: европейский центр анализа числа солнечных пятен (среднемесячные сглаженные - Rm) - SIDC http://sidc.oma.be и американский центр космической погоды - SWPC https://www.swpc.noaa.gov (среднемесячные сглаженные – F10.7m). Как две независимо измеряемые характеристики одного процесса они должны коррелировать, что и проявляется в исторических рядах данных Rm и F10.7m. Однако при экстраполяции вперед они могут существенно разойтись уже на масштабе 2-х лет в силу принципиально различающихся методов построения долгосрочного прогноза, что можно видеть на примере прогноза на 25-й цикл от ноября 2019 г. (рис. 1, левая панель) для SSN (SIDC, верхняя часть) и F10.7 (SWPC, нижняя часть). Предсказание F10.7 в системе SWPC принципиально некорректно – результат выходит за предел возможных значений. С 2020 г. SWPC ввел новый подход к долгосрочному прогнозированию СА, базирующийся на масштабе цикла, что существенно повысило общую достоверность результатов.

В данной работе представлены результаты развития подхода к долгосрочному прогнозированию в масштабе цикла SSN на основе инструмента искусственного интеллекта - искусственной нейронной сети (ИНС) [1,2]. Результаты приведены на рис. 1, правая панель для 25-го цикла СА.

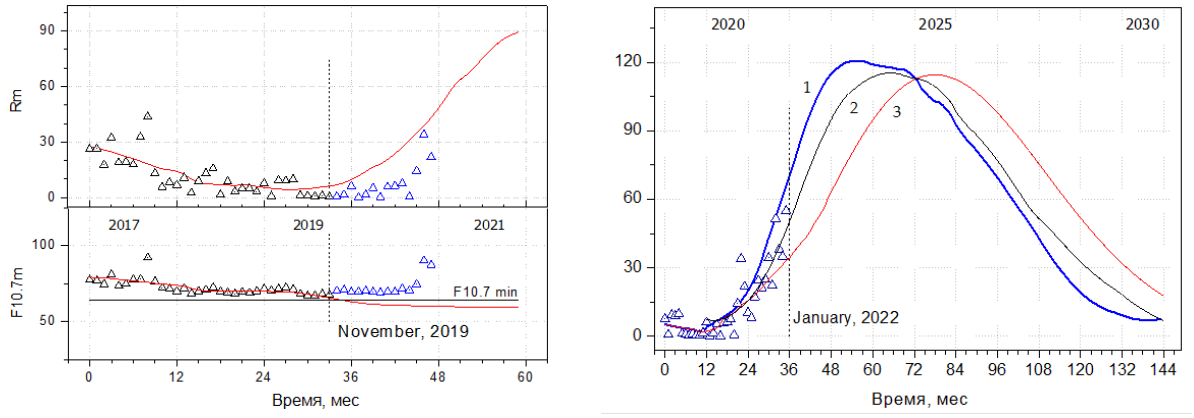


Рис. 1. Долгосрочное прогнозирование солнечной активности: Rm и F10.7m на ноябрь 2019 г. (левая панель) и по индексу – числу солнечных пятен (SSN) – 25-й цикл (правая панель). Кривая 1 – прогноз на основе ИНС, 2 – усредненное представление, 3 –SWPC.

1. Головко В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение // М: ИПРЖР. 255 с. ISBN 5-93108-005-8. 2001.
2. Бархатов Н. А., Королёв А. В., Пономарев С. М., Сахаров С. Ю. Долгосрочное прогнозирование индексов солнечной активности методом искусственных нейронных сетей // Изв. ВУЗов. Радиофизика. Т. XLIV. № 9. С. 806-814. 2001.

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВАЖНОСТИ ВХОДНЫХ ПРИЗНАКОВ В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Владимиров Р.Д., Широкий В.Р., Баринов О.Г., Мягкова И.Н., Доленко С.А.

НИИ Ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, dolenko@srd.sinp.msu.ru

Целью настоящего исследования является сравнение результатов, полученных в процессе исследований важности входных признаков (ВП) в задаче прогнозирования геомагнитных возмущений при помощи различных моделей машинного обучения (МО). Прогнозируемыми значениями моделей являются значения экваториального индекса Dst, измеряемые один раз в час, прогнозирование осуществляется на 1-4 часа вперед [1]. Входными признаками в рассматриваемых моделях являются параметры межпланетного магнитного поля (ММП) и солнечного ветра (СВ), измеряемые в точке Лагранжа L1, значения самого Dst-индекса (все - с временными задержками от 0 до 23 часов) и временные характеристики, описывающие положение Земли относительно Солнца и суточное вращение Земли (всего 148 признаков).

Общая схема работы алгоритма приведена ниже:

1) Исследуемая модель МО обучается на данных с полным набором из n ВП, и производится оценка точности прогнозирования на тестовом наборе данных.

2) Каждый из используемых ВП поочередно удаляется из набора данных.

3) На каждом из n уменьшенных наборов производится обучение модели МО, и производится оценка изменения точности по сравнению с моделью, полученной на шаге 1.

4) Тот ВП, удаление которого приводило к минимальному падению (или максимальному увеличению) качества прогноза по сравнению с остальными моделями, полученными на шаге 3, окончательно удаляется из набора.

5) Далее описанный алгоритм повторяется с шага 1, на полученном наборе.

Данные действия повторяются до тех пор, пока не останется последний единственный ВП. После этого мы считаем, что ВП ранжированы по важности в обратном порядке.

При отборе ВП методом линейной регрессии наиболее важными оказались следующие ВП (в скобках указана задержка в часах относительно текущего момента): Dst(0), B_z(1), H_den(0), B_magn(1), H_den(3), SW_spd(2), где Dst – значение индекса Dst, B_z и B_magn – значения ММП, H_den – плотность протонов СВ, SW_spd – скорость СВ.

При отборе ВП методом градиентного бустинга комплект наиболее важных ВП изменился. В работе проведено сравнение полученных комплектов ВП, а также качества прогноза индекса Dst, полученного с помощью искусственных нейронных сетей на основе отобранных комплектов ВП.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик НИИЯФ МГУ 6.1 (01201255512) и 2.1 (115041410195).

1. Мягкова И.Н., Широкий В.Р., Владимиров Р.Д., Баринов О.Г., Доленко С.А. Прогнозирование значений геомагнитного индекса Dst при помощи адаптивных методов. Метеорология и гидрология, 2021, №3, с.38-46.

КРОСС-АДАПТАЦИЯ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Э.З.Каримов, В.Р.Широкий, О.Г.Баринов, И.Н.Мягкова, С.А.Доленко

НИИ Ядерной физики имени Д.В.Скобельцына МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, dolenko@srd.sinp.msu.ru

Целью настоящего исследования является отображение данных из одного домена в другой с использованием различных методов машинного обучения (МО), их сравнение между собой и сравнение прогнозов параметров космической погоды с помощью МО, сделанных на разных доменах, соответствующих данным с разных космических аппаратов (КА).

Данная работа актуальна ввиду вывода из эксплуатации таких КА, как ACE и GOES-15. В качестве альтернативы предполагается использование данных с КА DSCOVR и GOES-16, соответственно. Однако на них установлены различные приборы, которые для одних и тех же исследуемых параметров могут давать различающиеся значения. В то же время для обучения моделей МО, прогнозирующих параметры космической погоды, и их применения для прогнозирования в реальном времени требуются большие объемы исторических данных в одном домене, что невозможно, если использовать данные только актуальных КА. Этим обусловлена важность данной работы по отображению данных из одного домена в другой.

В случае КА ACE использовались следующие входные признаки (ВП) — компоненты и модуль межпланетного магнитного поля, скорость и плотность солнечного ветра. В случае КА GOES-15 рассматривались потоки заряженных частиц с энергией >2МэВ.

В работе использовались следующие подходы для отображения данных из одного домена в другой:

1) Перевод значений одного ВП в значения того же ВП в домене другого КА; отображение множества значений всех ВП (компонент многомерного временного ряда (МВР)) в значения каждого ВП в домене другого КА.

2) Перевод с погружением и без погружения временного ряда ВП.

3) Осуществление отображения (перевода) с помощью линейной регрессии и с помощью многослойного персептрона.

В работе изучались все комбинации подходов и рассчитывались метрики (средняя абсолютная ошибка, средняя квадратичная ошибка, коэффициент детерминации R^2) на тестовом наборе, представляющем собой последний по времени отрезок МВР.

На полученных данных проводилось обучение многослойного персептрона, и сравнивалось качество прогнозирования таких величин, как Dst-индекс и часовые потоки релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе Земли. Между собой сравнивались результаты моделей, обученных на данных с переводом в общий домен и без перевода.

Показано, что отображение данных разных КА в единый домен позволяет повысить качество прогнозирования.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тематик НИИЯФ МГУ 6.1 (01201255512) и 2.1 (115041410195).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГЕОИНДУЦИРОВАННЫХ ТОКОВ НА БЛОК «ГЕНЕРАТОР – ТРАНСФОРМАТОР»

Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н.

ТГУ, г. Тольятти, Россия, VVVahnina@yandex.ru

На функционирование электрических сетей высокого напряжения оказывают существенное влияние климатические факторы, к числу которых относятся температура, влажность и давление воздуха, высота над уровнем моря, дождь, ветер, пыль, соляной туман, иней, содержание в воздухе коррозионно-активных агентов, смены температур, солнечное излучение и др. В арктических регионах возрастает влияние еще одного фактора внешней среды, а именно космической погоды, одним из проявлений которой являются геомагнитные возмущения [1].

Особенности влияния геомагнитных возмущений рассмотрены на примере компьютерного моделирования типового фрагмента изолированной энергосистемы в составе: синхронный генератор с номинальной мощностью 200 МВт – повышающий трансформатор (ТДЦ-400000/220/13,8) – воздушная линия электропередачи (ВЛ-220кВ) – понижающий трансформатор (ТДЦ-400000/220/13,8) – нагрузка суммарной мощностью 137,5 МВт, 46,8 Мвар. Геомагнитные возмущения моделировались источником геоэлектрического поля, действующего между заземляющими устройствами повышающего и понижающего трансформаторов.

Величина напряженности геоэлектрического поля выбиралась таким образом, чтобы максимальное значение геоиндуцированного тока (ГИТ) в каждой фазе трансформаторов достигало 100 А, а частота имела значение 0,05 Гц. При указанных условиях переход режима перемагничивания магнитной системы повышающего и понижающего трансформаторов под воздействием ГИТ из рабочей области в область технического насыщения, происходит через ≈9 сек после начала воздействия, вызывая многократное увеличение тока и мощности намагничивания. Насыщение магнитной системы повышающего и понижающего трансформаторов оказывает существенное влияние на работу синхронного генератора.

При неизменной величине тока возбуждения происходит снижение напряжения на шинах генератора (на ≈ 6 %) и как следствие уменьшение активной мощности генератора с первоначального уровня 135 МВт до минимального значения ≈120 МВт (на ≈11 %) в момент максимума ГИТ. Одновременно с уменьшением активной мощности увеличивается выработка генератором реактивной мощности с первоначального уровня ≈5 Мвар до максимально значения ≈37,5 Мвар (в 7,5 раз), которая компенсирует увеличение мощности намагничивания повышающего и понижающего трансформаторов.

Благодаря действию автоматического регулятора возбуждения (АРВ) напряжение на генераторных шинах не снижается, а даже незначительно увеличивается (на ≈1,5 %). Последнее обстоятельство объясняет менее глубокое снижение активной мощности генератора, до ≈122,4 МВт (на ≈9,3 %). Выработка генератором реактивной мощности увеличивается почти в 2 раза (до ≈70 Мвар), что необходимо для поддержания неизменного уровня напряжения на генераторных шинах.

1. Селиванов, В.Н., Данилин А.Н., Колобов В.В., Сахаров Я.А., Баранник М.Б. Результаты длительных регистраций токов нейтралях силовых трансформаторов. - Труды Кольского научного центра РАН, 2010(1), № 1, Вып.1. - Энергетика, с. 84-90.

ГЕОЭФФЕКТИВНЫЕ ПОТОКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА 2015 ГОДА: СОЛНЕЧНЫЕ ИСТОЧНИКИ И МАГНИТОСФЕРНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Вахрушева А.А.[1], **Калегаев В.В.**[2], **Шугай Ю.С.**[2], **Капорцева К.Б.**[2]

[1] *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия,*
vakhr.anna@gmail.com

[2] *НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия*

Одним из главных факторов, определяющих условия в околоземном космическом пространстве, является солнечный ветер - поток частиц ионизованной плазмы, испускаемый Солнцем и с большой скоростью движущийся от него. Солнечный ветер переносит с собой магнитное поле, формирующееся в конвективной зоне Солнца. Потоки солнечного ветра и корональные выбросы масс, распространяясь в межпланетной среде до околоземной орбиты, могут приводить к магнитным бурям. В то же время связь между параметрами потока, наблюдаемыми на орбите Земли, и явлениями, вызывающими эти потоки на Солнце, сложна и неоднозначна.

В данной работе проанализированы условия в солнечном ветре, сопровождающие четыре наиболее мощные бури 2015 года. Для каждого события определены возможные типы потоков солнечного ветра, связанные с их корональными источниками: 1) квазистационарные высокоскоростные потоки (источник – корональные дыры), 2) спорадические потоки (источник – корональные выбросы масс), 3) медленный ветер (источники – гелиосферный токовый слой, стримеры, границы корональных дыр и т.п.). Исследуемые бури, разной интенсивности и с разным характером развития, вызваны разными источниками на Солнце. На основе сопоставления ультрафиолетовых изображений Солнца, временных изменений D_{st}-индекса геомагнитной активности, вариаций параметров (плотности, скорости, давления) солнечного ветра и межпланетного магнитного поля на орбите Земли; сделан вывод о геоэффективности потоков солнечного ветра и определены их солнечные источники.

В работе показано, что солнечный ветер с различными параметрами может вызывать магнитные бури различной интенсивности на Земле. В свою очередь, параметры солнечного ветра на околоземной орбите зависят как от корональных источников, так и от изменений, происходящих в процессе распространения и взаимодействия потоков друг с другом в гелиосфере.

ОСНОВЫ ПЕРСПЕКТИВНОЙ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ВЛИЯНИЯ АВРОРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ НА УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРАНСПОЛЯРНЫХ СИГНАЛОВ. ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И РЕЗУЛЬТАТЫ НЕКОТОРЫХ МОДЕЛЕЙ

Кузьмин А.К.[1], Мерзлый А.М. [1], Никифоров О.В.[1], Петрукович А.А. [1], Садовский А.М.[1], Янаков А.Т.[1], Позин А.А.[2], Щукин Ю.А.[2], Потанин Ю.Н.[3], alkkuzmin@mail.ru

1- ИКИ РАН, г. Москва, Россия, 2 – НПО Тайфун Росгидромет, г. Обнинск, Калужская обл., 3 – ЦАО Росгидромет, г. Долгопрудный, Моск. обл.

В докладе анализируется современное состояние исследований характеристик авроральной ионосферы. Спектр разнообразия масштабов авроральных структур, которые могут встречаться на пути сигналов в ионосфере, иллюстрируется примерами авроральных изображений и характеристик плазмы, полученных с разных орбит КА, с поверхности Земли и зондирующих ракет. Рассматриваются конкретные примеры результатов орбитальных, ракетных и наземных измерений характеристик полярной ионосферы, сопровождающих генерацию неоднородностей электронной концентрации и сцинтилляции трансполярных сигналов, полученные конкретными авторами и группами различных лабораторий в полярных областях ионосферы в различных электродинамических условиях. Анализируются некоторые результаты современных моделей генерации неоднородностей в каспе и полярной шапке, как причин сцинтилляций распространяющихся сигналов. Вопрос: «почему генерация сцинтилляций сигналов GNSS и других систем возникает при «протыкании» ими одних авроральных структур и не возникает при «протыкании» других ?» - остаётся. Ответ на него, наиболее вероятно, связан с условиями генерации и развития плазменных неустойчивостей, приводящих к образованию структур плазменных неоднородностей разных масштабов от нескольких сантиметров до нескольких десятков километров в разных слоях ионосферы, разных секторах MLT полярной ионосферы, и разных условиях ММП. Как, с помощью каких средств диагностики, и с помощью каких моделей, в каких конкретных наборах условий необходимо получать и анализировать информацию о состоянии локальных областей среды ? – это задача, решение которой позволит в будущем научиться предсказывать условия распространения трансполярных сигналов. Поэтому для перспективных исследований необходима методическая основа развития технологий постановки экспериментов, нацеленных как на глобальные, так и на локальные комплексные наблюдения авроральных структур, продольных и замыкающих токов, характеристик неоднородностей в плазме в разных слоях ионосферы, и др., и их влияния на условия распространения волн на частотах, используемых орбитальными навигационными и другими системами.

Работа выполнена в рамках темы «Плазма» в ИКИ РАН.

ВАРИЦИИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ В ОКТЯБРЕ-НОЯБРЕ 2021 Г

Махмутов В.С., Базилевская Г.А., Стожков Ю.И., Свиржевский Н.С., Свиржевская А.К., Филиппов М.В., Калинин Е.В.

ФИАН, г. Москва, Россия, makhmutv@sci.lebedev.ru

Проведен анализ данных о солнечной активности и данных измерений космических лучей в земной атмосфере и на наземных нейтронных мониторах в октябре-ноябре 2021 г. Основное внимание уделено исследованию вспышечной активности на Солнце 28-30 октября 2021г., которая явилась источником первого солнечного протонного события, зарегистрировано в текущем 25 цикле солнечной активности. Представлены временные и энергетические характеристики этого события.

Модель авроральной ионосферы с PC индексом в качестве входного параметра

Николаева В.Д.[1,*], Гордеев Е.Г.[2], Николаев А.В.[1], Рогов Д.Д.[1], Трошичев О.А.[1]

[1] Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия
[2] Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург, Россия
[*] nikolaeva.vera@gmail.com

Модель авроральной ионосферы (AIM-E) (Nikolaeva et al., 2021) предназначена для расчета химического состава в E-слое высокоширотной ионосферы и учитывает солнечное крайнее УФ излучение и высыпания электронов магнитосферного происхождения, что чрезвычайно важно для авроральной ионосферы, особенно в возмущенных геомагнитных условиях. Чтобы увеличить точность таймирования модели AIM-E при моделировании динамики состояния ионосферы в ходе геомагнитных бурь и суббурь, мы предлагаем параметризовать эмпирическую модель высыпаний электронов OVATION-Prime (Newell et al., 2010) с помощью наземного геомагнитного индекса PC (Troshichev et al., 1988). Это дает следующие преимущества: (1) поскольку индекс PC отражает геоэффективные условия солнечного ветра, появляется возможность проводить ионосферные расчеты с входными данными, соответствующими реальным геомагнитным условиям; (2) оперативно оценивать текущую геомагнитную обстановку, поскольку индекс PC доступен в режиме реального времени с минутным временным разрешением. Результаты моделирования AIM-E с использованием OVATION-Prime (PC) демонстрируют хорошее согласие с данными радара некогерентного рассеяния (EISCAT UHF, Tromso) и данными вертикального зондирования в арктической зоне. Модель хорошо воспроизводит электронное содержание в вертикальном столбе (90—140 км) и критическую частоту спорадического слоя E, сформировавшегося за счет высыпающихся электронов. AIM-E (PC) может применяться для мониторинга спорадического слоя E в режиме реального времени и во всей высокоширотной ионосфере, включая авроральную и субавроральную зоны.

Newell, P. T., Sotirelis, T., & Wing, S. (2010). Seasonal variations in diffuse, monoenergetic, and broadband aurora. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 115(A3). https://doi.org/10.1029/2009JA014805.

Nikolaeva, V., Gordeev, E., Sergienko, T., Makarova, L., & Kotikov, A. (2021). AIM-E: E-Region Auroral Ionosphere Model. Atmosphere, 12(6), 748. https://doi.org/10.1007/s11207-020-01752-7.

Troshichev, O. A., Andrezen, V. G., Vennerstrøm, S., & Friis-Christensen, E. (1988). Magnetic activity in the polar cap—A new index. Planetary and space science, 36(11), 1095-1102. https://doi.org/10.1016/0032-0633(88)90063-3.

ПЛАЗМЕННЫЙ ИОННЫЙ КОМПАКТНЫЙ АНАЛИЗАТОР (ПИКА) ДЛЯ МАЛЫХ АППАРАТОВ И КУБСАТОВ

Шестаков А.Ю., Моисеенко Д.А., Журавлев Р.Н., Шувалов С.Д.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, sartiom1@yandex.ru

С развитием технологий проблема мониторинга космической погоды становится всё более острой. Корональные выбросы массы на Солнце приводят к развитию магнитных бурь в земной магнитосфере, что в свою очередь негативно сказывается на линиях электропередач и системах связи и может приводить к серьёзным авариям. Под угрозой также находятся спутники на орбите Земли, которые также подвергаются воздействию солнечных энергичных частиц, которые сопровождают критические события на Солнце. Имея в распоряжении простые и надёжные инструменты мониторинга космической погоды можно принять оперативные меры реагирования на приближающиеся возмущения магнитосферы.

Важными аспектами при разработке мониторинговых приборов является их простота, отказоустойчивость, малые габариты и вес. При упрощении конструкции достигаются лучшие показатели отказоустойчивости прибора и снижается себестоимость изготовления одного образца, минимизация габаритов и снижение массы способствуют снижению себестоимости выведения на орбиту таких приборов. Эти меры позволят в перспективе создавать распределённые сети мониторинга космической погоды для оценки состояния космической среды как на больших масштабах, так и локально в околоземном пространстве.

В данном докладе представлены результаты разработки плазменного ионного компактного анализатора (ПИКА), который сочетает в себе перечисленные требования к малому мониторинговому прибору. Прибор ПИКА разрабатывался как часть мониторингового комплекса из ионного и электронного анализатора, а также телескопа энергичных частиц. Прибор также может иметь применение и на околоземных полярных орбитах, где может проводить измерения высыпаний протонов в полярных областях.

Прибор сочетает в себе два типа анализа: по соотношению V/q (используется фильтр скоростей) и электростатический по соотношению E/q (используется электростатический анализатор). В настоящий момент завершается сборка лётного исполнения прибора. По результатам предварительных наземных испытаний прибор позволяет проводить измерения в диапазоне энергий 50 эВ – 10кэВ с энергетическим разрешением $\Delta E/E \approx 4\%$ и имеет массовое разрешение $M/\Delta M \approx 5$ (в диапазоне энергий до 5 кэВ), прибор позволяет разделять потоки протонов и альфа-частиц солнечного ветра. Поле зрения прибора составляет 30°×2°, что даёт возможность регистрировать полную функцию распределения частиц по скоростям в солнечном ветре при правильной ориентации поля зрения прибора и оси вращения аппарата. Расчётный геометрический фактор прибора составляет $G \approx 1{,}3 \cdot 10^{-7}$ ($см^2 \cdot стер \cdot эВ/эВ$). Внешние габариты прибора составляют 111 × 82 × 80 мм, что делает возможным его установку на аппараты формата CubeSat от 1U. Масса всего прибора, с полным комплектом электроники составляет 700 ± 50 г. Предварительные оценки информативности составляют порядка 0,3 кбит/с.

ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ЗОН ЗАСВЕТКИ ОДНОСКАЧКОВЫМИ ЛУЧЕВЫМИ ТРАЕКТОРИЯМИ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ В 24-М ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Мёрзлый А.М.[1,4], Калишин А.С.[5],Мингалев И.В.[2], Моисеев И.А.[1], Никифоров О.В.[1], Сахаров Я.А.[2,6], Суворова З.В.[2], Черняков С.М.[2], Шубин В.Н.[3], Янаков А.Т.[1],

[1] *ФГБУН Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия,* *pinega142@yandex.ru*
[2] *ФГБУН Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия,*
[3] *ФГБУН ИЗМИРАН, г.Троицк, Россия*
[4] *Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия*
[5] *ФГБУ ААНИИ, г.Санкт-Петербург, Россия*
[6] *ФГБУН Геофизический центр РАН, г.Москва, Россия*

В докладе представлены результаты численного моделирования области на поверхности Земли, в которую попадают выходящие из одного передатчика односкачковые лучевые траектории радиоволн КВ диапазона. Исследуются изменения этой зоны в течение суток через каждые три часа для разных сезонов за период с 2009 по 2020 годы для разных частот КВ диапазона, близких к максимальной применимой частоте для данных условий.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОХОЖДЕНИЯ МЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН ЧЕРЕЗ ИОНОСФЕРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ

Мингалев И.В.[1], Суворова З.В.[1], Мингалев О.В.[1], Ахметов О.И.[1], Мёрзлый А.М.[2,3], Попов В.Ю.[2]

[1] *ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, suvorova@pgia.ru;*
[2] *ФГБНУ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия;*
[3] *Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия*

В данной работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия электромагнитных волн длиной от 1 до 2 м, распространяющейся в ионосферной плазме на высоте E и F-слоев, с плазменной неоднородностью, которая представляет собой вытянутую вдоль местного геомагнитного поля цилиндрическую область с повышенной электронной концентрацией. Радиус области лежит в пределах от 1 до 10 м. Волна распространяется перпендикулярно оси цилиндра. Область моделирования имеет размеры порядка нескольких десятков длин волны. На длину волны приходится от 20 до 30 узлов сетки. Сетка равномерна по всем направлениям, цилиндрическая область расположена в центре области моделирования. Вне цилиндрической области плазма однородна, а внутри нее однородна вдоль оси цилиндра. Рассматриваются несколько вариантов, когда концентрация электронов и частота их столкновений соответствуют E, F1 и F2-слоям ионосферы в разное время суток. Для моделирования использовалась модель, основанная на численном интегрировании системы уравнений Максвелла и линеаризованного уравнения потока импульса для электронов с учетом внешнего геомагнитного поля. Для численного интегрирования применяется явная схема, в которой электрическое и магнитное поля вычисляются в одни и те же моменты времени в одинаковых узлах пространственной сетки, а также используется расщепление по пространственным направлениям и физическим процессам. Кроме того, используется противопотоковая аппроксимация пространственных производных (метод Годунова с коррекцией потоков). Схема является консервативной, монотонной, имеет 2-й порядок точности по времени и 3-й по пространственным переменным.

Обсуждается форма сигнала, отраженного от плазменной неоднородности, и плазменные колебания, индуцированные в ней проходящей электромагнитной волной.

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МЕТОДА НАКЛОННОГО НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Филиппов М.Ю., **Строев А.К.**, **Логовский А.С.**

АО РТИ, г. Москва, Россия, mfilippov@rti-mints.ru

Метод некогерентного рассеяния (НР) среди методов дистанционного зондирования выделяется возможностью определения параметров ионосферы вдоль направления зондирования с высоким разрешением по времени и пространству, возможностью независимо определять параметры нейтральной компоненты. Применение метода НР ограничено высокой стоимостью производства и эксплуатации аппаратуры, всего мире насчитывается около десяти установок, которые реализуют метод НР. Успехи ИСЗФ СО РАН в создании методов определения абсолютной величины электронной концентрации в метровом диапазоне длин волн на основе эффекта Фарадея, а также технологически реализуемая высокая мощность излучения в этом диапазоне делают метровый диапазон наиболее перспективным для НР.

В настоящем докладе интересна геометрия эксперимента, в отличие от большинства установок ориентированных в зенит, используемая приёмопередающая антенна имеет наклон около 20 градусов от вертикали. Антенна расположена на полярном круге и ориентирована на полюс.

В течение нескольких неполных суток с периодичностью 1 раз в час производились измерения методом НР в угломестных направлениях 45 и 60 градусов над горизонтом. Регистрировались наклонные профили мощности сигналов НР, которые пересчитывались в относительные величины плазменной частоты вдоль направления накопления. Экспериментально полученные таким образом суточные вариации профилей плазменной частоты качественно совпадают с наблюдаемыми на установках НР, расположенных в Тромсё (Норвегия), и хорошо объясняются теоретическими представлениями о вариациях такого рода.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОВОЛН КВ ДИАПАЗОНА С ИОНОСФЕРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

Суворова З.В.[1], Мингалев И.В.[1], Мингалев О.В.[1], Ахметов О.И.[1], Мёрзлый А.М.[2,3], Попов В.Ю.[2]

[1] *ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, suvorova@pgia.ru;*
[2] *ФГБНУ Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия;*
[3] *Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия*

В данной работе представлены результаты численного моделирования взаимодействия плоской электромагнитной волны КВ диапазона, распространяющейся в ионосферной плазме на высоте E и F-слоев, с плазменной неоднородностью с повышенной электронной концентрацией. Эта неоднородность представляет собой цилиндрическую область, вытянутую вдоль местного геомагнитного поля. Радиус области сопоставим с длиной волны. Волна распространяется перпендикулярно оси цилиндра. Область моделирования имеет размеры порядка нескольких десятков длин волны. На длину волны приходится от 20 до 30 узлов сетки. Сетка равномерна по всем направлениям, цилиндрическая область расположена в центре области моделирования.

Для моделирования использовалась численная модель, основанная на численном интегрировании системы уравнений Максвелла и линеаризованного уравнения потока импульса для электронов с учетом внешнего геомагнитного поля. Для численного интегрирования применяется явная схема, в которой электрическое и магнитное поля вычисляются в одни и те же моменты времени в одинаковых узлах пространственной сетки, а также используется расщепление по пространственным направлениям и физическим процессам. Кроме того, используется противопотоковая аппроксимация пространственных производных (метод Годунова с коррекцией потоков). Схема является консервативной, монотонной, имеет 2-й порядок точности по времени и 3-й по пространственным переменным.

Вне цилиндрической области плазма однородна, а внутри нее однородна вдоль оси цилиндра. Рассматриваются несколько вариантов, когда концентрация электронов и частота их столкновений соответствуют E, F1 и F2-слоям ионосферы. Обсуждается форма сигнала, отраженного от плазменной неоднородности, и плазменные колебания, индуцированные в ней проходящей электромагнитной волной.

ПРОБНЫЕ РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА СТЕНДЕ СУРА ПОСЛЕ ЕГО РЕКОНСТРУКЦИИ

Токарев Ю.В., Шиндин А.В., Сергеев Е. Н., Моисеев С. П., Белов Ю.В., Гоетц К.

НИРФИ ННГУ, г. Н.Новгород, Россия,yuri.tokarev@nirfi.unn.ru

Стенд СУРА (р.п. Васильсурск Нижегородской области, 56°с.ш., 46° в.д.) был создан как базовый инструмент для исследования нелинейных явлений в среднеширотной ионосфере в поле мощной электромагнитной волны. Его основу составляют три КВ-радиопередатчика и состоящая из трёх идентичных секций многодипольная антенна ППАДД диапазона 4.5-9.3 МГц [1]. Способность последней работать как в передающем, так и в приёмном режиме позволяет использовать стенд как радиолокатор для исследования объектов ближнего космоса от мезосферы Земли до солнечного ветра [2]. После ввода в строй в 1981 г. на стенде был выполнен цикл работ по декаметровому радиозондированию Луны как в моностатическом (с приёмом на ППАДД), так и в бистатическом режиме с приёмом на украинских радиотелескопах сети УРАН и космическом аппарате ESA-NASAWIND. Приём сигналов СУРЫ на этом КА использовался также для исследования условий прохождения мощных декаметровых радиоволн через ионосферу Земли, а также для изучения неоднородной структуры магнитослоя Земли [3].

За истекший период параметры антенны стенда в силу естественных причин износа проволочных конструкций (спайки, изоляторы, растяжки) стали заметно отличаться от первоначальных. Благодаря специальной программе поддержки уникальных научных установок в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2021 годы» в 2020-21 гг. была проведена реконструкция стенда и его инфраструктуры. В частности, была практически заново воссоздана система фазированияантенны стенда, обеспечивающая ориентацию луча и круговую поляризацию нормальных волн. Важным этапом является апробация стенда после его реконструкции в реальных условиях эксплуатации. Весьма эффективен для этой цели радиолокационный режим, когда проверяются передатчики, их система управления, антенно-фидерный тракт и сама антенна стенда в приёмном и предающем режимах.

В качестве целей были выбраны Луна и КА WIND, локализованный в настоящее время в окрестности лагранжевой точки L1 на расстоянии около 1.5 млн. км от Земли. Тестовые эксперименты проводились 03—08 августа 2021 г. в диапазоне 9 МГц. В этот период Луна сближалась по углу с КА и оказалась с ним в пределах луча локатора в новолуние 8.08.21. Четыре последних сеанса в плане геофизической обстановки (отсутствие грозовых помех, критические частоты ионосферы, поглощение и пр.) оказались удачными и вошли в обработку, Полученные результаты, их анализ, а также направления дальнейших работ по расширению функциональных возможностей стенда представлены в анонсируемом докладе.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках соглашения № 21-72-10131.

1. Белов И.Ф., Бычков В.В., Гетманцев Г.Г. и др. // Препринт НИРФИ № 167. 1983.

2. Караштин А.Н., Комраков Г.П., Токарев Ю.В., Шлюгаев Ю.В.// Изв. ВУЗов, Радиофизика. 1999. Т. **42.** №8. С.765.

3. Токарев Ю.В. // Изв. ВУЗов, Радиофизика. 2014. Т. **57.** №3. С.179.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОЛНОГО ЭЛЕКТРОННОГО СОДЕРЖАНИЯ (ПЭС) ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ БУРЬ

Шубин В.Н., Гуляева Т.Л.

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

Модели полного электронного содержания (ПЭС) играют ключевую роль в мониторинге и прогнозировании ионосферы. Ионосферные бури это возмущения плазменного компонента верхней атмосферы Земли, вызванные возмущениями на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере. Широко признано, что основными механизмами ионосферных бурь являются изменения состава нейтральной атмосферы, термосферные ветры и электродинамические процессы. Предлагаемая модель состоит из медианной модели ПЭС, основанной на данных глобальных ионосферных карт для спокойных геомагнитных условий [1] и ряда аэрономических поправок к ней, связанных с образованием главного ионосферного провала, аврорального пика электронной плотности, а также с изменениями температуры и состава термосфера [2].

Исследование выполнено при поддержке совместного проекта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 19-52-250001_Кипр_а, и Национального исследовательского фонда Кипра RPF Bilateral/Russia(RFBR)1118/0004 (RENAM).

1. Shubin V.N., Gulyaeva T.L. // Adv. Space Res. 2022. V.69. P.168–175.
2. Шубин В.Н., Деминов М.Г. // Геомагнетизм и аэрономия. Т.59. №4. С.461−473. 2019.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЛИТЕЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ГЕОИНДУКТИРОВАННЫХ ТОКОВ В МАГИСТРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ «СЕВЕРНЫЙ ТРАНЗИТ»

Селиванов В.Н., Аксенович Т.В., Билин В.А., Сахаров Я.А.

ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия, v.selivanov@ksc.ru

Мировой опыт показал, что геомагнитные бури являются причиной разнообразных функциональных нарушений и аварий электрооборудования в электроэнергетических системах. Актуальной задачей по защите энергетических систем России является разработка отечественной системы регистрации геоиндуктированных токов (ГИТ) в электроэнергетических системах, а также разработка методов и устройств защиты.

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. В 2011 г. в рамках международного проекта EURISGIC [1] была создана региональная система мониторинга токов в нейтралях трансформаторов, накопившая значительный массив информации о влиянии геомагнитных возмущений на магистральную электрическую сеть протяженностью 800 км [2]. Система мониторинга включает в себя три устройства регистрации ГИТ на подстанциях 330 кВ «Выходной», «Лоухи» и «Кондопога», сервер сбора, хранения и обработки данных, веб-сервер http://eurisgic.org, магнитовариационную станцию LOZ (Ловозеро). Система работает в автоматическом режиме, размещая результаты в базе данных в почти реальном времени.

В 2021 г. РНФ поддержал наш проект «Теоретические и экспериментальные исследования геоиндуктированных токов в магистральной электрической сети «Северный транзит»», который будет выполняться в течение 2022 – 2023 гг. За весь срок выполнения проекта предполагается выполнить теоретические и экспериментальные исследования, включающие в себя:

- модернизацию и поддержку уникальной системы мониторинга ГИТ в магистральной сети «Северный транзит»;
- разработку теории, методов и алгоритмов анализа данных мониторинга, а также проведение комплексных исследований по анализу воздействия ГИТ на электроэнергетические системы;
- разработку комплекса технических и организационных мероприятий для уменьшения негативного воздействия геомагнитных возмущений на энергетические и транспортные системы.

В докладе представлены предварительные результаты анализа данных, полученных системой мониторинга ГИТ с июня 2011 г.

Работа выполняется за счет средств гранта Российского научного фонда, проект №22-29-00413.

1. Viljanen A. // Space Weather. 2011. №. 9. P. S07007.
2. Barannik M.B., Danilin A.N., Kat’kalov Yu.V. at al // Instruments and Experimental Techniques. 2012, Vol. 55, No. 1. P. 110.

ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА И ГЕОМАГНИТНЫХ УСЛОВИЙ ПРИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИТ НА СТАНЦИИ ВЫХОДНОЙ (2012-2018)

Шевелева Д.А., Апатенков С.В., Сахаров Я.А., Гордеев Е.И.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия, st035310@student.spbu.ru

В работе исследовались 140 событий с наибольшими амплитудами геоиндуцированных токов (ГИТ) на станции Выходной (65 MLat) зарегистрированные в 2012-2018 годах. Показаны отличия параметров солнечного ветра и геомагнитных индексов от типичных значений. Видны характерные увеличения скорости солнечного ветра и динамического давления, пониженная Bz компонента ММП. Существенно сдвинуты от обычных значений индексы AE, AL, Dst, а также скорость роста (падения) Dst/dt. Проанализирована связь с ударными волнами в солнечном ветре.
Работа проведена в рамках проекта РНФ № 19-77-10016

НАБЛЮДЕНИЯ ГИТ НА ПОДСТАНЦИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ ВО ВРЕМЯ ИНТЕНСИВНЫХ СУББУРЬ: ОТДЕЛЬНЫЕ СЛУЧАИ

Дэспирак И.В.[1], **Сецко П.В.**[1], **Сахаров Я.А.**[1], **Селиванов В.Н.**[2], **Валев Д.**[3]

[1] *ПГИ, г. Апатиты, Россия, despirak@gmail.com*
[2] *ЦЭС КНЦ РАН, г. Апатиты, Россия*
[3] *ИКИТ БАН, г. Стара Загора, Болгария*

Мы выбрали несколько событий регистрации интенсивных геомагнитно-индуцированных токов (ГИТ) на подстанциях магистральных электрических сетей на Северо-Западе России и сравнили их с проявлением и пространственно-временной динамикой авроральных суббурь. Развитие суббури контролировалось наземными магнитометрами сети IMAGE и системой камер всего неба в Апатитах и в Ловозере. Появление ГИТ регистрировалось на ~~двух~~ разных технологических сетях: на ЛЭП «Северный транзит» (330 кВ, станции «Выходной» и «Кондопога»), тупиковой сети Колэнерго (110 кВ, станция «Ревда»), расположенных в авроральной зоне (ГИТ >15-20А), и на финском газопроводе вблизи г. Мантсала, расположенном в субавроральной зоне (ГИТ >30А). Подробно рассмотрены три отдельных специфических события – 15 марта 2012 г., 17 марта 2013 г. и 20 декабря 2015 г. Установлено хорошее соответствие между профилем ГИТ и поведением геомагнитных индексов IL и Wp. Индекс Wp описывает волновую активность суббури, IL аналогичен индексу AL, но рассчитывается по данным станций IMAGE. Также удалось проследить соответствие между развитием тонкой пространственно-временной структуры суббури и появлением ГИТ на трубопроводе в Мантсала и на подстанциях в Выходном, Ревде и Кондопоге.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 20-55-18003_Болг_а) и ННФБ (проект КП-06-Русия / 15).

Может ли глобальное МГД моделирование предсказать величину геоиндуцированных токов при магнитных бурях?

Пилипенко В.А.(1,2), Козырева О.В.(1,2), Сахаров Я.А.(1,3)

1 Геофизический Центр РАН, Москва
2 Институт физики Земли РАН, Москва
3 Полярный Геофизический Институт, Апатиты

К настоящему времени глобальное МГД моделирование динамики околоземного пространства с использованием суперкомпьютеров достигло настолько высокого уровня, что позволяет приступить к оперативному прогнозу космической погоды и ее эффектов по данным межпланетных спутников в реальном времени. Одним из наиболее серьезных проявлений космической погоды является возбуждение геоиндуцированных токов (ГИТ) в протяженных линиях электропередач (ЛЭП) при резких вариациях геомагнитного поля. Поскольку глобальное МГД моделирование предсказывает возмущение магнитного поля по всей поверхности Земли, то естественно возникает вопрос – может ли оно предсказать ожидаемую вариабельность поля dB/dt и амплитуду ГИТ? Для ответа на этот вопрос мы рассмотрели магнитную бурю 27-28 мая 2017 г. Для этой бури была рассчитана динамика планетарного распределения геомагнитных возмущений с помощью различных кодов глобального МГД моделирования с реалистичными условиями в солнечном ветре. Цель этой международной кампании состояла в сравнении полученных глобальных свойств геомагнитных возмущений с высоким временным разрешением (1 мин) с фактическими наблюдениями. Во время анализируемой магнитной бури магнитное возмущение постепенно увеличивалось, а затем медленно затухало. Однако во время максимального возмущения на магнитную бухту накладывались интенсивные нерегулярные пульсации Pi3. Эти пульсации не являются квази-синусоидальными волнами, как типичные пульсации Pc5, а скорее представляют собой квазипериодическую последовательность магнитных импульсов с временными масштабами ~ 10-15 мин. В этот период с повышенной Pi3 активностью были зафиксированы очень высокие значения ГИТ (до ~ 50 А) в трансформаторных подстанциях ЛЭП на Кольском полуострове. Проведенный анализ вклада геомагнитных возмущений в быстрый рост ГИТ во время магнитной бури 27-28 мая 2017 г. показывает, что современное глобальное МГД моделирование может предсказывать возникновение бурь и суббурь («магнитосферных ураганов»), но не в состоянии воспроизвести возбуждении мелкомасштабных возмущений типа Pi3 пульсаций («магнитосферных молний»), которые и являются драйвером интенсивных ГИТ. Работа поддержана грантом РНФ 21-77-30010.

ОСОБЕННОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ МАГНИТОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ НА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В СРЕДНИХ ШИРОТАХ

Сахаров Я.А. [1,6], **Золотой С.А.**[3], **Мёрзлый А.М.**[2,4], **Садовский А.М.**[2], **Петрукович А.А.**[2], **Янаков А.Т.** [2], **Никифоров О.В.**[2], **Селиванов В.Н.**[5]

[1] *ФГБУН Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия, sakharov@pgia.ru*
[2] *ФГБУН Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия*
[3] *НИРУП «Геоинформационные системы», Минск, Беларусь*
[4] *Совет по космосу РАН, г. Москва, Россия*
[5] *ФИЦ Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия*
[6] *ФГБУН Геофизический центр РАН, г.Москва, Россия*

При развитии сильных и сверхсильных магнитосферных возмущений высыпания заряженных энергичных частиц существенно меняют параметры ионосферы, при этом ионосферные токи усиливаются не только в авроральных, но и в субавроральных и средних широтах. В докладе по опубликованным данным проведен анализ возможного воздействия сильных магнитосферных возмущений на наземные технологический системы, в первую очередь, линии электропередач и системы энергораспределения, расположенные в средних широтах. В качестве наиболее ярких примеров выбраны бури октября 2003г. и ноября 2004г.

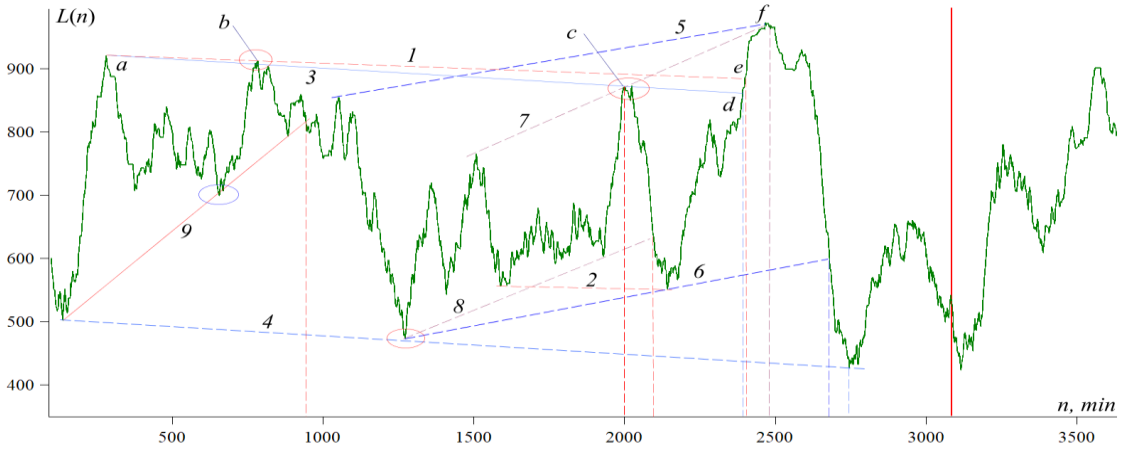
По результатам анализа сделан вывод о необходимости расширения наземных систем регистрации магнитосферных возмущений в зону средних широт.

КРАТКОСРОЧНЫЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, СВЯЗАННЫЕ С ЛИНЕЙНЫМИ ГРАНИЦАМИ ВАРИАЦИЙ ФУНКЦИОНАЛА ОТ СТАТИСТИКИ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Коган Л.П., Вольвач А.Е., Канониди К.Х., Надежка Л.И., Бубукин И.Т., Штенберг В.Б.

ННГАСУ, г. Нижний Новгород, Россия, L_kog@list.ru

В работе рассматриваются краткосрочные предвестники сильного землетрясения магнитудой 7.3, которое произошло в регионе Индонезии 14.12.2021 в 03:20:24 UTC. Для определения совокупности краткосрочных предвестников события использовался подход, предложенный в [1–3]. Соответствующая методика сводится к исследованию свойств статистики мелкомасштабных вариаций плотности вероятности измеряемых полей. Свойства таких флуктуаций, как это было теоретически и экспериментально показано в [1–3], способны существенно меняться в последние несколько часов перед сильными землетрясениями. На рисунке приведен вид отвечающего [3] функционала $L(n)$, с параметрами h=0,1, A=1000, M=100. Рисунок отвечает измерениям магнитометра Chater Towers (CTA) с 00:00 12.12.2021 по 12:32 14.12.2021. Обозначения линейных объектов в виде скользящих границ *1* и *9*, а также каналов *1–2*, *3–4*, *5–6* и *7–8* – те же, что и в [3]. Введенные в [3] величины $\Delta\alpha$=1,5º и δ=1,4%. Момент указанного землетрясения обозначен сплошной вертикальной красной прямой линией. По оси абсцисс отложено время в минутах в интервале $M \le n \le 3629$. Дополнительные точки [3] выделены эллипсами.



Вертикальные пунктирные линии отвечают времени возникновения предвестников [3] и меняются в интервале от 2122 до 344 минут до землетрясения, с концентрацией времени почти всех выявленных предвестников на отрезке от 1088 до 344 минут перед указанным событием. Результаты, соответствующие другим региональным магнитометрам и компонентам магнитного поля, коррелируют с полученными данными. Применяемый подход позволяет установить краткосрочные предвестники приближающихся землетрясений, и в том числе для событий высокой магнитуды.

1. Коган Л.П. Геомагнетизм и аэрономия 2015. **Т. 55.** № 4. С. 525.
2. Kogan L.P., Bubukin I.T., Shtenberg V.B. Chaos, Solitons and Fractals 2021. **V. 145.** April 2021. 110807.
3. A.E. Volvach, L.P. Kogan, K.H. Kanonidi, et al. // Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation 2022. **V. 108.** 106200. https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2021.106200

ИССЛЕДОВАНИЕ СИНХРОНИЗАЦИИ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ВОЗБУДИМОСТИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ ИНТЕРНЕТА С ПОМОЩЬЮ РЕККУРЕНТНОЙ НЕЙРОСЕТИ ДЛЯ АНАЛИЗА ТОНАЛЬНОСТИ ТЕКСТА

Ожередов В.А., Бреус Т.К.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, ozheredov2016@gmail.com

При помощи разработанного авторами ПО было скачано около миллиона сообщений с крупнейшего российского научного форума https://dxdy.ru. Данный форум насчитывает около сотни тысяч русскоязычных пользователей по всему земному шару. Сообщения были сгруппированы по дням (период от ноября 2012 до декабря 2021 года) и дополнены временными рядами по солнечной активности (СА) за тот же самый период. Эти данные были использованы для проверки гипотезы о влиянии СА на ежедневный эмоциональный фон пользователей форума.

Ежедневный эмоциональный фон пользователей вычислялся как среднее за день значение эмоциональной окраски отдельных сообщений – выпуклой суммы фидуциальных вероятностей того, что данное отдельно взятое сообщение является положительно или отрицательно эмоционально откршенным с точки зрения выбранного машинного классификатора. В качестве последнего выступала рекуррентная нейронная сеть, конструируемая при помощи библиотеки TextBlob (Python). Качество работы данного классификатора было протестировано авторами работы на обучающей базе данных, содержащей 298 752 сообщения из Твиттера, вручную рассортированных на позитивные (доброжелательные) и негативные (злобные).

Авторам удалось показать наличие длинносрочных корреляций между СА и временным рядом средних ежедневных значений эмоциональной окраски сообщений, что подтверждает гипотезу о влиянии СА на состояние нервной системы человека на популяционном уровне (как минимум России, как максимум всего мира).

1. https://textblob.readthedocs.io

ГЕНЕРАЦИЯ СВИСТОВЫХ ВОЛН ВБЛИЗИ МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Кузичев И.В., Васько И.Ю., Артемьев А.В

New Jersey Institute of Technology, г. Ньюарк, США, kuzicheviv@gmail.com

Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия.

Свистовые волны (правополяризованные электромагнитные волны с частотами значительно выше локальной протонной циклотронной частоты, но ниже локальной электронной циклотронной частоты) в солнечном ветре и в межпланетных ударных волнах имеют большое значение для понимания динамики плазмы из-за их роли в регуляции теплового потока и рассеянии электронов. Взаимодействие электронов с этими волнами, в том числе, приводит к формированию характерных для солнечного ветра функций распределения электронов по скоростям (eVDF) [1,2]. Такие функция распределения представляют собой сумму нескольких электронных популяций, обычно двух (плотный кор с достаточно малыми температурами и более горячее гало со значительно меньшей плотность) или трёх (к двум упомянутым популяциям добавляется электронный пучок), которые дрейфуют относительно друг друга. Эти функции распределения могут быть неустойчивы по отношению к генерации свистовых волн. Современные спутниковые измерения предоставили убедительные доказательства того, что свистовые волны генерируются локально за счет так называемых свистовых неустойчивостей теплового потока [3,4].

Такие экспериментальные успехи стимулировали теоретические и численные работы по исследованию влияния локально генерируемых свистовых волн на электроны. Результаты кинетических моделирований продемонстрировали, в частности, различную роль параллельных (в смысле угла между волновым вектором и внешним магнитным полем), антипараллельных и косых волн [1, 2, 5]. Но пока наблюдательных данных о косых и антипараллельных свистовых волнах в солнечном ветре довольно мало, большинство наблюдаемых свистовых волн параллельны. Кроме того, наблюдения антипараллельных волн могут быть осложнены их меньшими, по сравнению с параллельными волнами, амплитудами. В то же время наблюдения eVDF часто демонстрируют, что горячие электроны обладают температурной анизотропией, которая может приводить к генерации антипараллельных свистовых волн. Поэтому представляет интерес исследовать сами функции распределения электронов, а не электромагнитые поля, чтобы понять, как часто мы можем ожидать генерацию антипараллельных волн, и каковы параметры генерируемых волн. В этой работе мы представляем результаты анализа линейной устойчивости большого набора eVDF, наблюдаемых космическим кораблем WIND.

1. Kuzichev et al., 2019, APJ, https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab3290
2. Micera et al., 2020, ApJL, https://doi.org/10.3847/2041-8213/abc0e8
3. Tong et al., 2019, ApJL, https://doi.org/10.3847/2041-8213/aaf734
4. Tong et al., 2019, ApJ, https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab1f05
5. Vasko et al., 2020, PoP, https://doi.org/10.1063/5.0003401

МНОГОСПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ТОКОВЫХ СЛОЕВ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ НА 1 А.Е.

Васько И.Ю.

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

Анализ структуры токовых слоев по данным односпутниковых миссий позволил установить ряд важных свойств данных структур на расстоянии 1 а.е. от Солнца. В частности, было показано, что токовые слои кинетических масштабов в солнечном ветре формируются за счет развития турбулентного каскада [1]. Кроме того, было показано, что токовые слои удовлетворяют условию, необходимому для развития магнитного пересоединения [2]. Однако, при анализе односпутниковых измерений приходится предполагать локальную одномерность токовых слоев и, кроме того, вмороженность данных структур в поток плазмы (гипотеза Тейлора), для того чтобы перевести временные профили различных характеристик плазмы и магнитного поля в пространственные профили. Данные предположения не требуются при анализе многоспутниковых наблюдений, которые позволяют оценить скорость распространения токового слоя, степень его одномерности и плотности тока, используя измерения магнитного поля на нескольких спутниках.

В настоящей работе представлены результаты анализа тонких токовых слоев в солнечном ветре по данным многоспутниковой миссии Magnetospheric Multiscale (MMS). Используя измерения спутников MMS было отобрано около 1000 токовых слоев, которые наблюдались в невозмущенном солнечном ветре на четырех аппаратах. Токовые слои были отобраны используя метод Particle Variance Increments [3] и имеют толщины в диапазоне от 10 до 1000 км, то есть кинетические масштабы. Анализ многоспутниковых измерений показал, что на масштабах пространственного разнесения между спутниками MMS (вплоть до сотен километров) токовые слои являются одномерными структурами, которые действительно вморожены в поток плазмы солнечного ветра. Кроме того, проведено сравнение двух различных оценок плотности тока, одна из которых получена с помощью измерениий магнитного поля на четырех аппаратах (метод курлометра), а вторая получена по измерениям магнитного поля на одном спутнике (метод тайминга, используемый при односпутниковом анализе токовых слоев). Показано, что оценки, полученные с помощью односпутникового метода находятся в удовлетворительном согласии с оценками, полученными с помощью многоспутниковых измерений.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом, проект № 21-12-00416.

1. Vasko I.Y., Alimov K., Phan T. et al. // arXiv:2112.15256.
2. Vasko I.Y., Alimov K., Phan T. et al. // Astrophys. J. Lett. 2021. V. 923 L19.
3. Greco A., Matthaeus W., Perri S. et al. // Space Science Reviews 2018. V. 214. pp. 27.

МОДЕЛЬ ДИФФУЗИИ СВЕРХТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ВЫСОКОАМПЛИТУДНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ СВИСТОВЫХ ВОЛНАХ

Французов В.А.[1,2], Артемьев А.В.[1,3], Шустов П.И.[1], Петрукович А.А.[1]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, as.lukin.phys@gmail.com*
[2]*НИУ ВШЭ, Факультет физики, г. Москва, Россия*
[3]*Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США*

Спутниковые наблюдения в различных околоземных плазменных системах (головная ударная волна, области плазменных инжекций, области магнитного пересоединения, радиационные пояса) фиксируют присутствие интенсивных электромагнитных свистовых волн, которые могут эффективно рассеивать и ускорять сверхтепловые электроны. Наиболее универсальной характеристикой такого рассеяния является коэффициент диффузии, определяемый дисперсионными свойствами волн и характеристиками фонового магнитного поля. Наиболее распространённой моделью коэффициентов диффузии является квазилинейная модель, применимость которой определяется малой интенсивностью волн. При этом в неоднородном магнитом поле, характерным для всех вышеперечисленных плазменных систем, квазилинейная модель работает для когерентных волн и не требует наличия широкого волнового спектра. Однако открытым остаётся вопрос обобщения квазилинейных уравнений коэффициентов диффузии на случай больших волновых амплитуд. В этой работе мы рассматриваем модель диффузии электронов в неоднородном магнитном поле и получаем общее выражение, переходящее в уравнение квазилинейной теории при малой волновой амплитуде, но характеризующееся нелинейной зависимостью от интенсивности волн при большой волновой амплитуде.

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМИ ФЛУКТУАЦИЯМИ НА ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

С.Р. Камалетдинов[1,2], И.Ю. Васько[1], А.В. Артемьев[1]
[1]*Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия,*
[2]*Факультет Физики, Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва, Serjesmail@gmail.com*

Бесстолкновительные ударные волны являются естественными источниками высокоэнергичных частиц, однако конкретный механизм ускорения тепловых электронов до сверхтепловых энергий до сих пор остается неясным. Проблема, в частности, заключается в том, что классический диффузионный механизм ускорения частиц (Diffusive Shock Acceleration) становится эффективным лишь на энергиях существенно превышающих характерные тепловые энергии частиц в невозмущенном потоке пламы, в области перед ударной волной. Недавние исследования показали, однако, что механизм стохастического ускорения (Stochastic Shock Drift Acceleration; SSDA) потенциально может решить эту проблему, так как позволяет “предускорять” тепловые частицы до необходимых надтепловых энергий [1]. В рамках данного механизма, электроны временно удерживаются вблизи фронта ударной волны за счет отражения от градинета магнитного поля на рампе ударной волны и последующего рассеяния мелкомасштабной волновой турбулентностью в области перед ударной волной.

Спутниковые наблюдения последних десятилетий надежно установили, что электростатические флуктуации вносят доминирующий вклад в высокочастотную (>100 Гц) волновую активность на околоземной ударной волне [2]. Однако, вопрос эффективности рассеяния тепловых и сверхтепловых электронов данными флуктуациями до настоящего времени не рассматривался количественно.

В рамках данной работы, был проведен количественный анализ рассеяния тепловых и сверхтепловых электронов уеденными электростатическими волнами, так называемыми ионными дырами, которые, согласно последним спутниковым наблюдениям [3], составляют значительную часть электростатических флуктуаций на головной ударной волне магнитосферы Земли. Используя детально разработанные методы квазилинейной теории, мы получили оценки квазилинейных коэффициентов питч-угловой диффузии и провели их сравнение с результатами численных расчетов методом тестовых частиц (test-particle simulations). Установлено, что квазилинейные оценки питч-угловой диффузии тепловых и сверхтепловых электронов хорошо согласуются с результатами численных расчетов в широком диапазоне параметров электростатической трубулентности, характерном для околоземной ударной волны. Используя полученные оценки квазилинейных коэффициентов диффузии получены оценки максимальной энергиии, до которой могут быть ускорены электроны по механизму SSDA. Показно, что электростатические флуктуации могут приводить к ускорению электронов от тепловых энергий порядка 10 эВ до сверхтепловых энергий порядка нескольких сотен эВ. Обсуждаются приложения данного результата для астрофизических ударных волн.

Работа выполнена при поддержке Российским научным фондом, проект № 19-12-00313.

1. Katou T. and Amano T. // The Astrophysical Journal 2019. V. 874. pp. 12.
2. Mozer F.S. and Sundkvist D. // J. Geophys. Res. 2013. V. 118. pp. 5415-5420.
3. Wang R. et al. // J. Geophys. Res. 2021. V. 126. id. e29357.

ВКЛАД КИНЕТИЧЕСКИХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ТРАНСПОРТ ИОНОВ ЧЕРЕЗ НОЧНУЮ МАГНИТОПАУЗУ

Лукин А.С.[1,2], Артемьев А.В.[3,1], Петрукович А.А.[1]

[1]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия, as.lukin.phys@gmail.com*
[2]*НИУ ВШЭ, Факультет физики, г. Москва, Россия*
[3]*Университет Калифорнии, Лос-Анджелес, США*

Существенный вклад в транспорт ионов через ночную магнитопаузу Земли может вносить диффузия частиц за счёт их рассеяния при взаимодействии с низкочастотными электромагнитными волнами. В этой работе мы рассматриваем данный механизм для одной из наиболее интенсивных волновых мод, наблюдаемых в магнитослое, – кинетичетических альвеновских волн (КАВ). Данная волновая мода характеризуется продольной компонентой электрического поля и, как следствие, может эффективно ускорять частицы вдоль магнитных силовых линий. В быстрых плазменных потоках КАВы обычно наблюдаются как широкий электромагнитный спектр, характеризующийся высокими значениями интенсивности электрического поля в области больших частот, соответсвующих доплеровскому сдвигу больших волновых чисел. Плотный частотный спектр рассматриваемых волн приводит к перекрытию резонансов волн и частиц, и, как следствие, к диффузии ионов в питч-угловом и энергетическом пространствах. В докладе рассматривается диффузия частиц, вызванная взаимодействием ионов с кинетической альфвеновской турбулентностью для реалистичной модели фланговой магнитопаузы Земли с неоднородным внешним магнитным полем, моделирующим тангенциальный разрыв. Спектр волн задается как сумма нескольких тысяч плоских волн, имеющих различные частоты и углы распространения. Получены оценки коэффициенты диффузии, как функции питч-угла и энергии частиц, для различных расстояний от магнитопаузы.

ЭФФЕКТ УШИРЕНИЯ РЕЗОНАНСА В ЗАДАЧЕ О РАССЕЯНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИОННО-ЦИКЛОТРОННЫМИ ВОЛНАМИ

Тоноян Д.С., Шевелёв М.М., Артемьев А.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия, tonoiands@vivaldi.net

Резонансное взаимодействие релятивистских электронов с электромагнитными ионно-циклотронными (ЭМИЦ) волнами считается одной из основных причин их рассеивания по питч-углу, приводящего к высыпаниям в ионосферу Земли. В большинстве существующих моделей радиационных поясов такое взаимодействие описывается в рамках квазилинейной теории. Однако волны с большими амплитудами (≥1 нТл) могут резонансно взаимодействовать с электронами в нелинейном режиме, что приводит к эффективному уширению диапазона резонансных энергий и питч-углов.

Этот доклад посвящен исследованию эффекта конечной ширины резонанса в рассеянии релятивистских электронов ЭМИЦ волнами. Оценена ширина резонанса для реалистичных амплитуд волн, распространяющихся в магнитном поле Земного диполя. Ширина резонанса включена в расчёт коэффициентов диффузии. Проведено сравнение коэффициентов диффузии с учётом конечности ширины резонанса с классическими коэффициентами квазилинейной теории. Определён диапазон энергий и питч-углов, для которого нелинейные эффекты уширения резонанса оказывают существенное влияние на рассеивания релятивистских электронов.

ВОЗБУЖДЕНИЕ ВОЛНОВОДА ЗЕМЛЯ-ИОНОСФЕРА НА ЧАСТОТАХ ВЫШЕ ПЕРВОГО ПОПЕРЕЧНОГО РЕЗОНАНСА МАГНИТОСФЕРНЫМ, ИОНОСФЕРНЫМ И НАЗЕМНЫМ ИСТОЧНИКАМИ

Ларченко А. В., Никитенко А. С., Лебедь О. М., Пильгаев С. В., Федоренко Ю. В.

ПГИ, г. Апатиты, Россия, alexey.larchenko@gmail.com

Методами численного эксперимента исследованы особенности возбуждения волновода Земля-ионосфера в диапазоне частот, начиная от частоты первого поперечного резонанса волновода (~1.8 кГц) и выше. Рассмотрены три типа источников электромагнитного поля: а) молниевые разряды, представленные осциллирующим вертикальным токовым диполем, находящимся в волноводе; б) токи в D-области ионосферы, вызванные изменениями холловской и педерсоновской проводимостей при нагреве ионосферы мощным модулированным КВ излучением; в) токи в неоднородностях верхней ионосферы, возбуждаемые электростатическими волнами аврорального хисса. Проанализировано распространение волноводных мод в условиях дневной и ночной нижней ионосферы. Показано, что вблизи частот поперечных резонансов наилучшим описанием электромагнитного поля в волноводе является его представление в виде суммы лево- и правополяризованных мод. Оценено влияние конечной проводимости земной поверхности на затухание этих мод.

РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ УНЧ-ВОЛНЫ С ЭЛЕКТРОНАМИ, НАБЛЮДАЕМОЕ ЗОНДОМ VAN ALLEN PROBE A

Михайлова О.С., Смотрова Е.Е., Магер П.Н., Климушкин Д.Ю.

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

Представлено исследование редкого явления - резонансного взаимодействия УНЧ-волны с электронами. 27 октября 2012 г. в утренней части магнитосферы на расстоянии около 5 R_E спутник Van Allen Probe A зарегистрировал УНЧ-волну длительностью 45 минут и амплитудой 0,7 нТл. Волна имела смешанную поляризацию, так как полоидальная (радиальная) и тороидальная (азимутальная) компоненты магнитного поля волны слабо различались по амплитуде. Частота волны составила 9,45 мГц, что классифицирует ее как волну Pc4.

Одновременно с волной зарегистрировано облако энергичных электронов, вероятно, инжектированных в магнитосферу в результате развития суббури. В потоках электронов наблюдались колебания с частотой наблюдаемой волны. Показано, что эти колебания являются следствием дрейфового резонанса волны с электронами с энергией около 37 кэВ. Установлено, что волна генерировалась градиентной неустойчивостью и являлась фундаментальной гармоникой альфвеновской волны с азимутальным волновым числом m~150-160, распространяющейся на восток.

Исследование выполнено при частичной поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-55-53009.

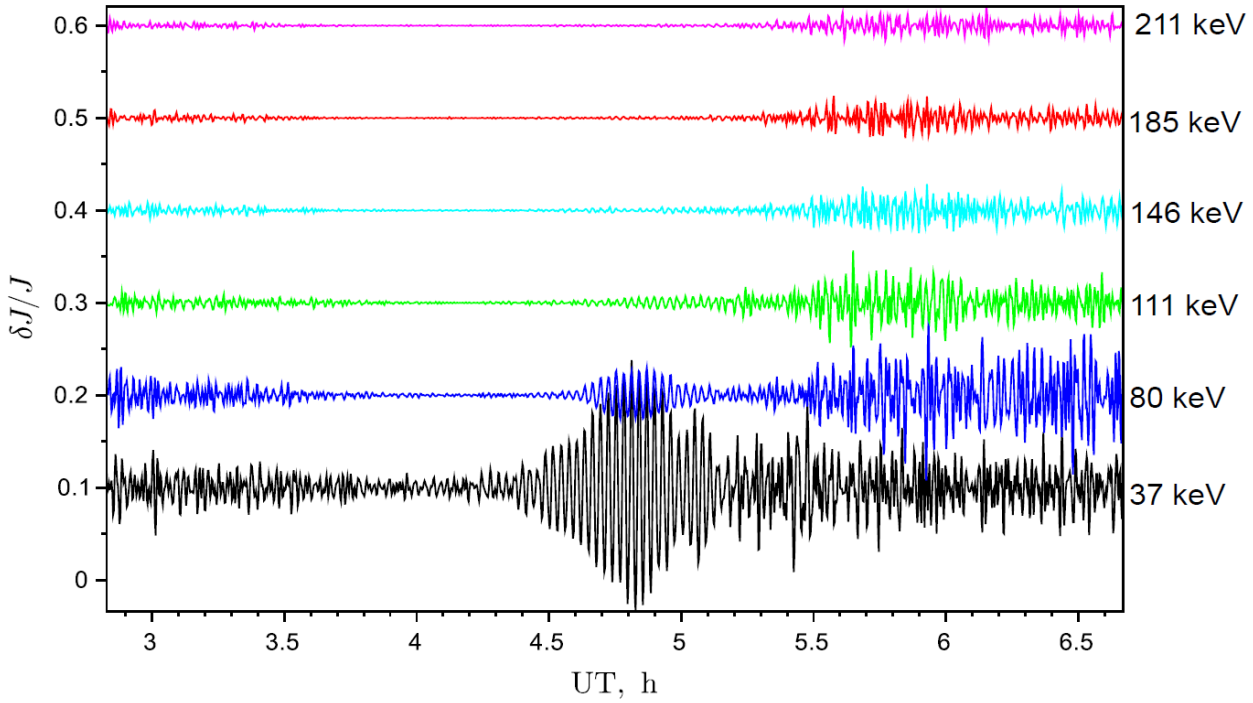


Рисунок 1. Осцилляции в потоках электронов во время события 27 октября 2012 г.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ОНЧ ИЗЛУЧЕНИЯ («ПТИЧКИ») И ИХ ТИПЫ

Клейменова Н.Г., Маннинен Ю., Турунен Т., Громова Л.И.

ИФЗ РАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kleimen@ifz.ru

Наземная регистрация высокочастотных (f > 5 кГц) ОНЧ излучений на земной поверхности сильно затруднена наличием интенсивных атмосферных помех («атмосфериков»). После их подавления удалось обнаружить неизвестные ранее виды коротких высокочастотных ОНЧ излучений на частотах выше 5-6 кГц, т.е. много выше половины экваториальной гирочастоты электронов на L-оболочке, соответствующей точке наблюдения, что свидетельствует об их неканализированном распространении. Обнаруженные излучения на слух воспринимались как щебет птиц, поэтому были названы «bird-emissions» ОНЧ излучениями («птички»). Динамические спектры отдельных сигналов иногда напоминали летящих птиц. Результаты анализа спектральных и морфологических характеристик «птичек» приведены в работах [1-3]. Установлено, что эти волны наблюдаются, в основном, в дневное магнитоспокойное время и часто в виде длительных (до 6-7 часов) серий из последовательностей отдельных коротких дискретных сигналов. В данной работе рассмотрены спектральные особенности таких длительных серий.

Показано, что многообразие динамических спектров излучений может быть разделено на два основных типа, отличающихся не только формой спектра, но и геомагнитными условиями во время их генерации. Первый, наиболее распространенный тип, характеризующийся резким началом на всех частотах, был назван “triggered-like” излучением, а второй, более узкополосный, с динамическим спектром, напоминающим штриховую линию, был назван “dash-like” излучением. Установлено, что первый тип ОНЧ излучений наблюдается при спокойных геомагнитных условиях, а второй – при слабо-возмущенных. Обсуждены спектральные особенности этих типов. Рассмотрено несколько, наиболее типичных длительных серий «птичек». Высказано предположении о генерации этих волн внутри плазмосферы, т.е. на значительно более низких L-оболочках, чем точка их регистрации.

Данные наблюдений на финской станции Каннуслехто в виде суточных, часовых и минутных спектрограмм находятся в свободном доступе на сайте обс. Соданкюля: http://www.sgo.fi/pub_vlf/.

1. Manninen J., Turunen T., Kleimenova N., et al. (2016) *Environmental Research Letters*, *11*(12). https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/12/124006.
2. Маннинен Ю., Турунен Т., Клейменова Н.Г. и др. (2017) Геомагнетизм и Аэрономия, 57(1), 36-44. https://doi.org/10.1134/S0016793217010091.
3. Manninen J., Kleimenova N., Turunen T., et al. (2021) J. Geophys. Res.: Space Physics. 126, https://doi.org/10.1029/2020JA02860.

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ИОНОСФЕРНОЙ ОБЛАСТИ ЗАСВЕТКИ ОНЧ АВРОРАЛЬНОГО ХИССА ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В АВРОРАЛЬНЫХ ШИРОТАХ.

Никитенко А.С.[1], Федоренко Ю.В.[1], Маннинен Ю.[2], Клейменова Н.Г[3,4], Ларченко А.В.[1], Бекетова Е.Б.[5]

[1]ПГИ, г. Апатиты, Россия;
[2]Sodankylä Geophysical Observatory, Sodankylä, Finland;
[3] ИФЗ РАН, г. Москва, Россия;
[4]ИКИ РАН, г. Москва, Россия;
[5]Филиал Мурманского арктического госуниверситета в г. Апатиты, г. Апатиты, Россия.
alex.nikitenko91@gmail.com

Представлены результаты наземных наблюдений всплесков ОНЧ аврорального хисса в обсерватории Ловозеро (Россия) и Каннуслехто (Финляндия), расположенных на близких геомагнитных широтах и разнесенных по долготе на расстояние ~400 км. Проанализировано 22 события, которые были зарегистрированы с 7 ноября 2018 г. по 9 февраля 2020 г.. Выявлено 4 типа пространственной структуры области засветки аврорального хисса: (1) область засветки имеет размеры, малые относительно расстояния между станциями; (2) область засветки вытянута по долготе; (3) область засветки перемещается по долготе; (4) смешанный тип. Для каждого типа сформулированы отличительные особенности временных вариаций на частоте 8 кГц горизонтальной компоненты магнитного поля, индекса круговой поляризации, отношения вертикальной компоненты электрического поля к горизонтальной компоненте магнитного и распределения плотности потока энергии по углам прихода. Размеры и положение области засветки ОНЧ аврорального хисса могут быть индикатором положения и поперечных размеров области, занятой мелкомасштабными неоднородностями электронной концентрации в верхней ионосфере.

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ СВИСТОВЫЕ ВОЛНЫ И ИХ СВЯЗЬ С ПОТОКАМИ НИЗКОЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Титова Е.Е.[1,2], Шкляр Д.Р.[2], Маннинен Ю.[3]

[1] *ПГИ, г. Апатиты, Россия, lena.titova@gmail.com*
[2] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*
[3]*Геофизическая обсерватория Соданкюля, Финляндия*

В плотной плазме свистовые волны занимают диапазон частот $f_{ci} < f < f_{ce}$, где f_{ci} и f_{ce} – ионная и электронная гирочастоты, соответственно. Высокочастотными волнами будем называть излучения в верхней части свистового диапазона на частотах > $0.5\ f_{ce}$. В настоящем докладе мы обсудим наблюдение таких волн 17.03.2019 на спутнике Van Allen Probe-B, когда он находился вблизи экватора на *L*-оболочках от 3 до 5.5.

ОНЧ излучения регистрировались на спутнике в широкой полосе частот от 3 до 30 кГц. Верхняя частота в спектре излучения следовала за ходом электронной гирочастоты и была ниже ее на 1-5 кГц. Спектр излучения часто имел два спектральных максимума, выше и ниже половины электронной гирочастоты, причем максимум на частотах > $f_{ce}/2$ мог быть как более, так и менее интенсивным. Высокочастотные свистовые волны на частотах > $f_{ce}/2$ наблюдались одновременно с увеличением потоков низкоэнергичных электронов с энергиями $>10^2$ эВ, имевшими поперечную анизотропию.

Для объяснения наблюдаемого спектра были выполнены расчеты локальных инкрементов волн как функции частоты и угла волновой нормали θ на основе одновременных измерений дифференциальных потоков электронов, которые также проводились на спутнике Van Allen Probe-B. Мы использовали измерения потоков прибором HOPE в диапазоне энергий от 0.015 до 29.2 кэВ в девяти питч-угловых каналах от 18° до 162°, а также данные прибора MagEIS по измерениям дифференциальных потоков электронов в диапазоне энергий от 32 до 246 кэВ в одиннадцати питч-угловых каналах от 8.2° до 171.8°. По этим измерениям определялась функция распределения электронов и, используя данные по плотности холодной плазмы и магнитному полю, вычислялся линейный инкремент волн на плоскости (f, θ). Для значений угла волновой нормали не равных нулю вклад в инкремент дают, вообще говоря, все циклотронные резонансы. Мы учитывали три циклотронных резонанса: $n = 1, 0, -1$, отвечающих наименьшим значениям резонансной скорости и дающим максимальный вклад в инкремент.

Расчеты инкремента свистовых волн показали присутствие выраженного максимума на частоте (0,8 - 0,9) f_{ce}. Для различных моментов времени оценены диапазон энергий и питч углы электронов, вносящих максимальный вклад в возбуждение этих высокочастотных свистовых волн. Например, в 16:44:48 UT, когда спутник находился на широте Lat = - 5.6° и L = 4.1, максимальный вклад в возбуждение высокочастотного максимума свистовых волн на 0,85 f_{ce} давали частицы с энергиями 0.5 – 3 кэВ и питч углами 97° - 120°.

Проведено сравнение расчетов инкрементов свистовых волн с характеристиками ОНЧ излучений, выделены области их наилучшего соответствия. Верхние частоты в спектрах наблюдаемых ОНЧ излучений были несколько ниже высокочастотных максимумов близких f_{ce}; это расхождение, вероятно, связано с особенностями распространения свистовых волн на высоких частотах вблизи экватора.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ Pc4-5 ВОЛН В МАГНИТОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА ARASE

Рубцов А.В.[1], **Nosé M.**[2], **Matsuoka A.**[3], **Miyoshi Y.**[2]

[1]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия, avrubtsov@iszf.irk.ru*
[2]*Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Nagoya, Japan*
[3]*Graduate School of Science, Kyoto University, Kyoto, Japan*

Проведено исследование частоты наблюдения ультранизкочастотных (УНЧ) волн диапазонов Pc4 (45–150 с) и Pc5 (150–600 с) в магнитосфере Земли по данным измерений космического аппарата Arase. В работе использовались данные измерений вектора магнитного поля с марта 2017 г. по декабрь 2020 г., во время минимума солнечной активности. Выбор дат обусловлен тем, что орбита спутника совершает полный оборот вокруг Земли (апогей орбиты оказывается в том же азимутальном направлении) за ~15 месяцев и, таким образом, была собрана статистика за три полных оборота.

Особенностью космического аппарата Arase является высокое наклонение орбиты, достигающее 40° относительно геомагнитного экватора, что открывает возможность прямого наблюдения фундаментальной гармоники УНЧ волн, имеющей узел на экваторе. Таким образом, распределения волн в магнитосфере были построены не только в экваториальной плоскости (диаграмма L-MLT), но и в меридиональной (L-MLat). Все обнаруженные волны разделялись в соответствии с доминирующим направлением осцилляций магнитного поля на полоидальные, тороидальные и компрессионные.

В результате были подтверждены некоторые результаты более ранних статистических исследований: УНЧ волны во время магнитных бурь регистрируются в ночном и вечернем секторах магнитосферы и имеют преимущественно тороидальную поляризацию; полоидальные волны чаще наблюдаются в вечернем и предполуденном секторах. Компрессионные волны ранее не часто оказывались объектом статистических исследований, поэтому следующие результаты можно считать новыми: частота появления компрессионных волн имеет узколокализованный максимум в предполуденном секторе, который, по-видимому, связан с направлением межпланетного магнитного поля; в секторе от полудня до вечера имеется второй экстремум частоты появления волн, однако в отличие от предполуденного, он является более равномерно распределённым по азимутальному направлению; максимум появления компрессионных волн сосредоточен в области геомагнитного экватора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-72-10139.

ВОЗМОЖНОСТИ ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АВРОРАЛЬНОГО КИЛОМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЗЕМЛИ

Викторов М.Е.[1], **Чернышов А.А.**[2], **Чугунин Д.В.**[2], **Мансфельд Д.А.**[1], **Могилевский М.М.**[2]

[1]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, mikhail.viktorov@ipfran.ru*
[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Сообщается об экспериментальных наблюдениях электромагнитного излучения на частотах выше гирочастоты электронов в плазме электронного циклотронного резонанса, удерживаемой в магнитной ловушке. Эти излучения интерпретируются как возбуждение быстрой необыкновенной волны на основной гармонике гирочастоты электронов, подобно возбуждению аврорального километрового излучения Земли. В работе предлагается метод исследования временных характеристик физических процессов, происходящих в области аврорального ускорения электронов, который применяется для анализа измерений на космическом аппарате ИНТЕРБОЛ-2 и адаптирован для анализа лабораторных данных. Совместный анализ данных спутниковых измерений и результатов лабораторных экспериментов показал сходство в развитии циклотронной неустойчивости.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-29-21037.

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ НПМ-01

Тренькин А.А., Буянов А.Б., Воеводин С.В., Горохов В.В., Долотов А.С., Жмайло В.А. Коблова О.Н., Лимонов А.В., Перминов А.В., Поколева М.Ю., Янбиков Н.Р.

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия, alexey.trenkin@gmail.com

Магнитогидродинамические (МГД) волны в околоземном космическом пространстве (ОКП) могут иметь природный и техногенный характер своего происхождения, а их исследования весьма важны как с точки зрения получения фундаментальных знаний, так и в части их влияния на техническую инфраструктуру и жизнедеятельность. Ввиду сложности, высокой стоимости, а зачастую и невозможности осуществления натурных исследований, важную роль играет расчетное моделирование процессов в ОКП. Интенсивное развитие вычислительных возможностей обуславливает значительный прогресс в моделировании широкого спектра процессов, протекающих в магнитосфере Земли на больших пространственных масштабах. В тоже время повышение сложности физико-математических моделей и расчетных методик подразумевает необходимость их верификации, в том числе, по результатам соответствующего лабораторного моделирования.

В докладе представлены данные экспериментальных исследований генерации и распространения альфвеновских волн на лабораторном электрофизическом стенде НПМ-01, а также результаты расчетного моделирования этих опытов.

Распространение волн происходило в столбе гелиевой плазмы диаметром до 0,2 м и длиной 6 м с концентрацией около 10^{12} см$^{-3}$, находящемся в однородном продольном магнитном поле индукцией до 0,1 Тл. Использовались две редакции экспериментов, отличающиеся способом возбуждения волн. В первой редакции источником возмущения служила магнитная антенна, возбуждаемая токами на частотах ниже циклотронной частоты ионов. Во второй – волны генерировалась при разлете плазмы, формируемой в результате взаимодействия с металлической мишенью лазерного излучения с энергией ~1 Дж, направленного вдоль силовых линий магнитного поля. Исследованы динамика разлета лазерной плазмы и параметры МГД-волн.

Проведено сравнение результатов этих опытов с данными, полученными в экспериментах на установке LAPD [1].

Для расчёта опытов первого типа использовалась методика, разработанная для решения задач о распространении МГД волн в ионосфере [2] и модифицированная с учётом конечного радиуса плазменного канала стенда НПМ-01.

Эксперименты второго типа были рассчитаны с помощью методики НМГД [3], представляющую собой эйлерову двумерную МГД методику с учётом диффузии магнитного поля, эффекта Холла и неравновесной кинетики. В этих расчётах получены данные о параметрах струи лазерной плазмы и МГД-волн, генерируемых при её разлёте.

Результаты расчётов находятся в удовлетворительном согласии с опытными данными.

1. Karavaev A.V., Gumerov N.A. et. al. // Phys. of Plasmas, 17(1), 012102, 2010.

2. Гаврилов Б.М., Гайнуллин К.Г., Жмайло В.А., Зецер Ю.И., Селин В.И. // Физика горения и взрыва, т. 40, №6, 2004.

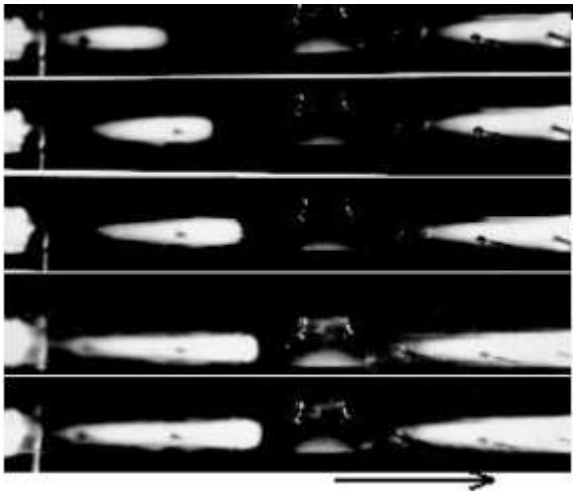
3. Eguzhova M.Yu., Zhmajlo V.A. et. al. //Proceedings of the 10th Seminar on New Models and Hydro codes for Shock Waves Processes on Condensed Matter. Pardubice, Chech. Rep. 2014. p. 165-176.

СРАВНЕНИЕ СВОЙСТВ ВОЛН В НЕОДНОРОДНОЙ НЕРАВНОВЕСНОЙ ГЕЛИОСФЕРЕ С ВОЛНАМИ ОБЪЕМНОГО ЗАРЯДА В ЛАБОРАТОРНОЙ ПЛАЗМЕ

Высикайло Ф.И.

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

Стоячие и бегущие волны электрического поля (со слабым нарушением нейтральности) в плазме – страты были известны Фарадею. Ганном в диэлектриках были обнаружены аналогичные бегущие ударные волны электрического поля. В 1985г. нами подробно исследовались и визуализировались в разряде остановленные прокачкой газа ударные волны параметра – E/N(x), напряженности электрического поля (E), приведенной к плотности числа частиц (N), на которых происходит рассеивание энергии заряженных частиц плазмы (рис.1).



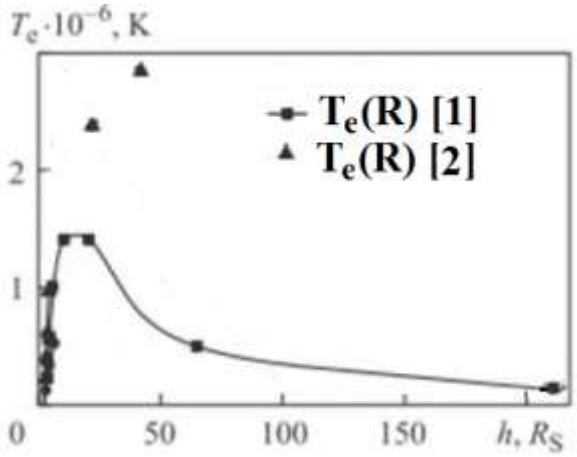


Рис.1. *Структура свечения соответствует максимуму приведенной напряженности электрического поля- E/N в области остановленной ударной волны (слева от окна в центре).*
Рис. 2*. Профиль температуры электронов при использовании для расчетов различных данных по плотности числа частиц N.*

Аналогичные стоячие и бегущие ударные волны приведенного электрического поля – $E/N(R)^{0,7} \sim T_e(R)$ формируются в гелиосфере [1]. Проверка моделей гелиосферы должна проводиться комплексно, с учетом типов положительных ионов, наблюдаемых в солнечном ветре (SW) и т.д. [1]. Используя метод Паннекука-Росселанда, Эддингтон аналитически оценил эффективный положительный заряд Солнца $Q_S \approx 300$ Кл. Нами установлено уже этот заряд Солнца соответствует появлению отражающих кулоновских зеркал не только для протонов, но и для альфа-частиц. Данные с солнечного зонда «Parker» указывают на рост эффективного заряда гелиосферы от 200 Кл (в области короны – 10^7 км) до 500 Кл в области Земли ($1{,}5 \cdot 10^{11}$ км). Таких электрических полей недостаточно для объяснения ионного состава SW. В соответствии с типами наблюдаемых в экспериментах Ю. Ермолаева положительных ионов в SW, мы определили величину эффективного квазипостоянного положительного заряда Солнца в $Q_S = 1400$ Кл. На рис. 2. приведены расчеты профилей температуры электронов по данным [1] и [2]. Согласно данным, полученным с солнечного зонда «Parker» нарушение нейтральности наблюдается на размерах в $1{,}5\ 10^{11}$ км, что существенно превышает радиус Дебая, о котором так много и беспредметно говорят Ю. Ермолаев и Д. Шкляр. Полученные различия обсуждаются в докладе.

1. Vysikaylo P.I., Korotkova M.A. J. Phys., Conf. Ser., 2018, vol. 1009, art. 012020.
2. Allen K.U. Astrofizicheskie velichiny (Spravochnik). Izdatel'stvo: Mir. 1977. 279 s. https://www.studmed.ru/allen-ku-astrofizicheskie-velichiny-spravochnik_5d9e8d105eb.html

УПРАВЛЕНИЕ ТИПОМ И ИНТЕНСИВНОСТЬЮ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВОЛН, ГЕНЕРИРУЕМЫХ СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В СИЛОВОЙ ТРУБКЕ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ

Березуцкий А.Г., Тищенко В.Н., Мирошниченко И.Б, Захаров Ю.П., Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия, a.berezuckiy@yandex.ru

В экспериментах на стенде КИ-1[1-3] и расчетах на кластерах показано [4], что метод резонансного взаимодействия сгустков с замагниченной плазмой позволяет управлять типом, частотой и интенсивностью квазистационарных волн, генерируемых в магнитной силовой трубке. Так, в замагниченной плазме возможна генерация альфвеновской, вистлерной, медленной магнитозвуковой волны или их сочетанием.

Одним из основных условий генерации необходимого типа низкочастотных волн в замагниченной плазме, является, безразмерный параметр ионно-плазменной длинны:

$$L_{pi} = \frac{l_{pi}\left[см\right]}{R_d\left[см\right]},$$

где $l_{pi} = \frac{c}{\omega_{pi}}$ - размерная ионно-плазменная длина, $R_d = \sqrt[3]{8\pi Q / B_0^2(1+\beta)}$ - динамический радиус сгустка лазерной плазмы. При $L_{pi}<0.3$ в плазме распространяются низкочастотные альфвеновские и медленные магнитозвуковые волны, а при $L_{pi}>0.4$ генерируются вистлеры.

Переходной режим генерации волн наблюдается, когда параметр ионно-плазменной длины лежит в диапазоне $0.3< L_{pi}<0.4$. Здесь кроме вистлеров, в среде, распространяется альфвеновская волна. В эксперименте показано, что при концентрации водородной плазмы $n0=5\cdot10^{12}$ см$^{-3}$, в среде распространяется вистлер со скоростью V=220 км/с и альфвеновская волна (V=70 км/с). Годограф магнитного поля, имеет правостороннюю круговую поляризацию, что характерно для вистлеров. Далее, поляризация трансформируется в левостороннюю, что связано с приходом альфвеновской волны.

Таким образом, лазерная плазма эффективно генерирует альфвеновскую и медленную магнитозвуковую волну, если отношение ионно-плазменной длины к динамическому радиусу одного сгустка равно L_{pi} ~0.05 ÷ 0.3, в области L_{pi} >0.4 формируются вистлерные волны, а в переходном режиме лазерная плазма генерирует альфвеновские волны и вистлеры.

Работа выполнена в рамках Программы №121033100062-5 Фундаментальных Исследований ИЛФ (Тема 0243-2021-0003) СО РАН

1. Тищенко В. Н., Захаров Ю. П., Шайхисламов И. Ф. [и др.] // Письма в ЖЭТФ. 2016. Т. **104**, № 5. С. 303.
2. Тищенко В. Н., Березуцкий А. Г., Бояринцев Э. Л. [и др.]. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47, № **9.** С. 849.
3. А. Г. Березуцкий, М. А. Ефимов, Ю. П. Захаров [и др.]. // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2020. Т. **84**. №. 7. С. 973.
4. Березуцкий А. Г., Тищенко В. Н., Захаров Ю. П. [и др.]. // Квантовая электроника. 2019. Т. **49**, № 2. С. 178.

РЕЖИМ ЛАМПЫ ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ В МАГНИТОСФЕРНОМ ЦИКЛОТРОННОМ МАЗЕРЕ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

Демехов А.Г.

ПГИ, г. Апатиты;
ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, andrei@ipfran.ru

Режим лампы обратной волны реализуется в магнитосфере при образовании резкого градиента („ступеньки“) на функции распределения энергичных заряженных частиц по скоростям [1]. В этом случае развивается абсолютная циклотронная неустойчивость, приводящая к генерации волн в ограниченной области магнитосферы вблизи минимума магнитного поля (экватора). Характеристики режима лампы обратной волны внимательно исследовались для интерпретации наблюдаемых свойств хоровых ОНЧ излучений [2-6]. Как правило, при этом предполагалась неизменность параметров невозмущенной функции распределения во времени или использовались упрощенные модельные уравнения [7]. В данной работе обсуждается влияние нестационарности исходной функции распределения энергичных заряженных частиц на порог, инкремент и нелинейную динамику неустойчивости в режиме лампы обратной волны в рамках самосогласованной системы уравнений, последовательно учитвающей взаимодействие волн с частицами в неоднородном внешнем магнитном поле.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-12-00416.

1. Trakhtengerts V.Y. // J. Geophys. Res. 1995. V. **100.** P. 17205–17210. https://doi.org/10.1029/95JA00843
2. Trakhtengerts V.Y. // Ann. Geophys. 1999. V. **17.** P. **9**5–100.
3. Titova E.E., Kozelov B.V., Jiricek F., Smilauer J., Demekhov A.G., Trakhtengerts V.Y. // Ann. Geophys. 2003. V. **21.** P. 1073–1081.
4. Trakhtengerts V.Y., Demekhov A.G., Titova E.E., Kozelov B.V., Santolik O., Gurnett D., Parrot M. // Phys. Pkasmas. 2004. V. **11.** P. 1345–1351.
5. Demekhov A.G., Taubenschuss U., Santolík O. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. **122.** P. 166–184. https://doi.org/10.1002/2016JA023057
6. Demekhov A.G., Taubenschuss U., Hanzelka M., Santolík O. // Geophys. Res. Lett. 2021. V. **47.** e2020GL086958. https://doi.org/10.1029/2020GL086958
7. Козелов Б.В., Титова Е.Е., Любчич А.А., Трахтенгерц В.Ю., Маннинен Ю. // Геомагн. Аэрон. 2003. Т. **43**. С. 635-644.

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ И ГЛОБАЛЬНЫХ ФАКТОРОВ НА СУТОЧНУЮ ДИНАМИКУ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ УНЧ МАГНИТНОГО ШУМА НА РАЗНЫХ ШИРОТАХ

Ермакова Е.Н., Рябов А.В., Котик Д.С.

НИРФИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Н. Новгород, Россия, l.ermakova@nirfi.unn.ru

Исследованы суточные вариации в спектрах амплитуды, поляризационного параметра ε и азимутального угла вектора магнитного УНЧ поля на разных частотах. Были проанализированы данные мониторинга компонент УНЧ магнитного шума на широтной цепи станций: высокоширотные станции Баренцбург (78.09N, 14.12E) и Ловозеро (68.01 N, 35.03 E), среднеширотная обсерватория НИРФИ ННГУ (56N, 46E), низкоширотные станции на о. Крит (35.15N, 25.20E) и в Израиле (30.61 N, 34.80 E.). Целью анализа данных было исследование влияния локальных ионосферных резонаторов на параметры первого и второго шумановских резонансов. Показано, что при одновременных измерениях вариации в спектрах амплитуды и азимутального угла имеют на разных станциях сходную динамику и определяются в основном активностью Всемирных грозовых очагов. Также эти параметры имеют сходную динамику на частотах шумановских резонансов (ШР) и на более низких частотах. В то же время, суточная динамика параметра ε (ε >0 при правой поляризации магнитного поля, ε<0 при левой поляризации) могла существенно различаться на всех обсерваториях. Обнаружено, что на всех станциях, кроме станции Баренцбург, влияние локального суб-ИАР существенно меняло степень эллиптичности магнитного поля, как на частотах ниже ШР, так и в частотной полосе первого ШР, причем под действием этого влияния величина ε могла изменяться в 1.5-2 раза. На низкоширотных станциях влияние суб-ИАР иногда приводило к изменению характера поляризации с левой поляризации на правую. Установлено также, что влияние суб-ИАР приводило к уменьшению степени эллиптичности магнитного поле в полосе первого ШР, когда граничная частота *fгр* (частота, на которой меняется характер поляризации магнитного шума) была меньше частоты ШР, а когда *fгр* была больше частоты первого ШР, степень эллиптичности либо увеличивалась, либо не менялась. Обнаружено, что суточные вариации ε в полосе второго ШР, которые коррелируют с вариациями ε первого ШР, были связаны с влиянием суб-ИАР. Обнаружено различие в характере суточных вариаций поляризационного параметра на частотах ниже и равных частоте шумановского резонанса. Модельные расчеты спектров поляризационных параметров показали, что различие может быть, связано с влиянием неоднородной структуры ионосферы над этими станциями, а степень различия определяется оптической толщиной суб-ИАР. Обнаружены вариации величины ε на частотах ШР в светлый период времени на низких и средних широтах: увеличение степени эллиптичности после восхода и перед заходом солнца, а также смещение частотной полосы в спектрах ε в осенний и зимний периоды. Модельные расчеты выявили возможность влияния резонатора суб-ИАР на спектры ε в эти периоды. Влияние ИАР на параметр ε и амплитуду магнитного поля в полосе первого ШР обнаружено только на средних широтах и станции Ловозеро. Высокодобротный альвеновский резонатор в ионосфере над этими пунктами мог приводить к уширению частотной полосы первого ШР, к смещению его центральной частоты, а также к “расщеплению” его частоты, но вариации амплитуды первого ШР из-за влияния ИАР не превышали 10-15%.

Анализ спектров азимутального угла вектора магнитного поля на частотах ШР показал, что локальные ионосферные резонаторы в зависимости от своей добротности могут изменять значения этих углов на $5\text{-}15^0$.

Работа выполнена по проекту № 0729-2020-0057 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, модельные расчеты выполнены при поддержке гранта РНФ № 20-17-00050.

МАРС: МНОГОТОЧЕЧНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ НА ПОСАДОЧНЫХ И ОРБИТАЛЬНЫХ АППАРАТАХ.

Куликов[1] С.В., Климов[1] С.И., Савин[1] С.П., Стяжкин[2] В.А., Скальский[1] А.А., Сантолик[3] О., Колмашова[3] И., Фильчиков[1] Г.Е.

[1] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия, kulikov@rx24.ru;*

[2] *ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия;*

[3] *IAP, г. Прага, Чехия;*

В настоящее время на орбитах вокруг Марса и на его поверхности находятся несколько орбитальных и посадочных аппаратов, что позволяет проводить многоточечные измерения в атмосфере, ионосфере и в околомарсианском плазменном окружении планеты. В связи с предстоящей российской миссией на Марс (проект ЭкзоМарс 2022) актуальным является создание инструмента для анализа взаиморасположения различных аппаратов в окрестностях Марса и на его поверхности для исследования динамики магнитосферных/ионосферных процессов.

На основе программного комплекса SPICE и имеющихся моделей характерных границ околомарсианского пространства (ударная волна, граница «магнитосферы», граница магнитного хвоста, граница ионосферы) разработан программный пакет для ситуационного анализа взаиморасположения орбитального аппарата MAVEN, посадочных аппаратов Insight и ЭкзоМарс2022.

Волновые процессы и загрязнения окружающей среды

Ларкина В.И.

ИЗМИРАН, *larkina@izmiran.ru*

Комплексный анализ результатов спутниковых измерений интенсивности низкочастотных электромагнитных излучений в звуковом диапазоне частот (100 Гц -20 кГц) (которые принято считать радиопомехами), потоков энергичных электронов, плотности и температуры ионосферной плазмы продемонстрировал реакцию ионосферной плазмы на процессы геомагнитных возмущений, подготовки активных сейсмических и медленных геодинамических процессов.

Обнаружено изменение параметров ионосферной плазмы, особенно, интенсивности низкочастотных шумов, над регионами радиоактивных загрязнений. На земном шаре есть зоны устойчивого наблюдения загрязнений окружающей среды. Обсуждаются результаты единичных измерений и статистической обработки результатов, которые свидетельствут об “отклике” параметров ионосферной плазмы на процессы над областями загрязнений.

Полученные результаты сравнительного анализа могут быть использованы при проектировании различных объектов народного хозяйства, в том числе сейсмостойкого строительства

РЕЗУЛЬТАТЫ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ, СВИДЕТЕЛЬСТВУЮЩИЕ О ЗАГРЯЗНЕНИИ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Ларкина В.И.

ИЗМИРАН, Москва, larkinav@mail.ru

Результаты комплексных экспериментов на искусственных спутниках Земли серии “Интеркосмос” (волновых, измерений энергичных электронов и протонов и сведения об изменениях в параметрах тепловой плазмы) свидетельствуют об “отклике” параметров ионосферной плазмы над областями загрязнения. Изучались (анализировались) индивидуальные случаи и полученные статистические характеристики

ГЕНЕРАЦИЯ ДНЕВНЫХ Pc4-5 ПУЛЬСАЦИЙ ГРАДИЕНТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ ПО МНОГОТОЧЕЧНЫМ СПУТНИКОВЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ

Рубцов А.В.[1], Михайлова О.С.[1], Магер П.Н.[1], Климушкин Д.Ю.[1], Ren J.[2], Zong Q.-G.[2]

[1]*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия, avrubtsov@iszf.irk.ru*
[2]*Institute of Space Physics and Applied Technology, Peking University, Beijing, China*

Представлены результаты анализа случая наблюдения долгоживущей полоидальной волны диапазона Pc4-5 на дневной стороне магнитосферы семью космическими аппаратами миссий Van Allen Probes, THEMIS и GOES [1]. Обнаружено, что первое появление волны было зарегистрировано спутником Van Allen Probe B за полчаса до поступления частиц, инжектированных суббурей. По данным индексов геомагнитной активности волна наблюдалась на фоне поздней фазы восстановления (SYM-H > –20 нТл), а суббуревая активность отсутствовала на протяжении 14 часов до первой регистрации волны. В то же время не обнаружено никаких признаков межпланетной ударной волны или иных возможных внешних источников генерации волны. Такой результат вновь ставит вопрос о роли суббуревых частиц в генерации УНЧ волн, по крайней мере, на дневной стороне магнитосферы.

Использование данных сразу семи космических аппаратов позволило непрерывно наблюдать волну в секторе MLT от 7 до 17 часов и на L-оболочках от 4.5 до 8 (за пределами плазмосферы, что было подтверждено данными плотности плазмы). Указанная волна охватывала частотные диапазоны Pc4 и Pc5, и наблюдалась в течение 15 часов. По данным магнитного и электрического полей было определено, что она является второй гармоникой стоячей полоидальной альфвеновской волны, что также было подтверждено с помощью расчёта собственных частот альфвеновской волны для заданных параметров плазмы. Изменение частоты волны обусловлено разной длиной силовых линий — чем дальше от Земли, тем длиннее силовая линия и ниже собственная частота альфвеновской волны. В то же время, тот факт, что изменение частоты волны имело ступенчатый характер до сих пор не объяснено и может быть связано как с пространственной структурой, так и являться временной особенностью.

По данным потоков заряженных частиц было определено, что волна находится в резонансе с протонами с энергией 100 ± 20 кэВ и питч-углами 40–60° и 120–140°. По эффекту конечного ларморовского радиуса для резонансной энергии было вычислено азимутальное волновое число $m = -209 \pm 31$. Расчёт m по теории баунс-дрейфового резонанса дал аналогичное значение $m = -220$ в случае баунс-дрейфового резонанса с баунс гармоникой –1. Таким образом, наблюдавшаяся волна является типичным представителем дневных магнитосферных УНЧ волн. В то же время, разные исследователи получали различные результаты касательно источника таких волн. В данном случае было определено, что источником энергии для генерации волны стал радиальный градиент функции распределения протонов. Поскольку первая регистрация волны произошла до суббури и при спокойном солнечном ветре, остаётся только предположить, что радиальный градиент образовался из-за восстановления конфигурации магнитосферной плазмы после магнитной бури, имевшей место за 36 часов до этого.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 20-55-53009.

1. Rubtsov A.V. et al. // Geophys. Res. Lett. 2021. V. **48.** e2021GL096182.

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЭФФЕКТОВ НЕЛИНЕЙНОГО РЕЗОНАНСНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОНОВ И СВИСТОВЫХ ВОЛН В РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЗЕМЛИ

Артемьев А.В.

ИКИ РАН, г. Москва, Россия; IGPP UCLA, Los-Angeles, USA, aartemyev@igpp.ucla.edu

Резонансное взаимодействие электронов и свистовых волн во внутренней магнитосфере ответственно как за потери электронов за счёт высыпания в ионосферу, так и за ускорение электронов до релятивистских энергий. Основным теоретическим подходом к описанию динамики потоков электронов за счёт их резонансов с волнами считается квазилинейная теория, предполагающая малось интенсивности волн. Спутниковые наблюдения последних десяти лет показали, однако, наличие большой популяции интенсивных свистовых волн, взаимодействующих с электронами в нелинейном резонансном режиме. В этом докладе будет сделан небольшой обзор примеров спутниковых наблюдений динамики потоков электронов, соответствующих такому нелинейному резонансному взаимодействию, и будут рассмотрены возможные подходы включения эффектов нелинейного резонансного взаимодействия в современные модели динамики радиационных поясов.

ВЛИЯНИЕ МАЛЫХ ВАРИАЦИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПЛАЗМЫ НА УСЛОВИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН СВИСТОВОГО ДИАПАЗОНА СКВОЗЬ УТРЕННЕЮ ИОНОСФЕРУ

Мизонова В.Г. [1], **Беспалов П.А.** [2]

[1] *НГТУ им. Р.Е. Елексеева, г. Нижний Новгород, Россия, vermiz*@mail.ru
[2] *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Рассмотрена задача о влиянии возмущений плазменной концентрации, обусловленных например инфразвуковыми волнами, на распространение и отражение электромагнитных волн свистового диапазона, падающих на утреннюю ионосферу сверху. Для расчетов использованы метод коллокаций решения граничной задачи и метод последовательных приближений, учитывающий малые возмущения концентрации. Наиболее сильная модуляция коэффициента отражения свистовых волн от утренней ионосферы связана с возмущениями концентрации на высотах порядка 80-100 км, где декремент затухания отдельных волновых мод увеличивается более чем на порядок в пределах достаточно локальной по высоте (менее 10-15 км) области. При этом относительное изменение коэффициента отражения свистовой волны может достигать 10-15%. Проанализированы особенности параметрического воздействия возмущений плазменной концентрации в инфразвуковой волне на волновое поле на земной поверхности. Полученные результаты важны для понимания взаимосвязи магнитосферных волновых процессов различной природы, как локально в ионосфере, так и глобально в плазменном магнитосферном мазере.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 20-02-00206А.

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА ТОНКОМ СТЕРЖНЕ, ПАРАЛЛЕЛЬНОМ ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ, В НЕГИРОТРОПНОЙ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ В РЕЗОНАНСНЫХ ДИАПАЗОНАХ ЧАСТОТ

Широков Е.А.

Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород, Россия, evshirok@gmail.com

В работе рассматривается рассеяние плоской электромагнитной волны на идеально проводящем тонком стержне конечной длины в замагниченной плазме, гиротропными свойствами которой можно пренебречь, в резонансных диапазонах частот. Стержень параллелен внешнему магнитному полю. Анализ основан на получении и решении интегрально-дифференциального уравнения для тока, индуцированного полем падающей волны на стержне. Это уравнение допускает приближённое аналитическое решение. По найденному току вычислены и проанализированы основные характеристики рассеяния, такие как его сечение.

РЕЗОНАНСНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ С РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ В МАГНИТОСФЕРАХ ЭКЗОПЛАНЕТ

Грач В.С., Демехов А.Г.

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

В работе анализируется резонансное взаимодействие энергичных электронов с радиоизлучением в магнитосферах экзопланет на примере планеты Tau Bootis b (tau boo b, Тау Волопаса b). Исследованы сравнительные особенности взаимодействия электронов с радиоизлучением экзопланеты, которое может быть детектировано на Земле, и с авроральным километровым радиоизлучением (АКР) в магнитосфере Земли.

Предполагается, что, как и АКР, радиоизлучение в магнитосфере Tau Bootis b представляет собой быструю необыкновенную волну (Х-моду). При резонансном взаимодействии релятивистских электронов с Х-модой на первом циклотронном резонансе существуют две резонансные области с противоположными знаками эффективной неоднородности.

Параметры магнитного поля, плазмы и радиоизлучения в магнитосферах экзопланет могут сильно отличаться от соответствующих параметров в магнитосферах Земли и планет Солнечной системы. В частности, в сравнении с магнитосферой Земли планета Tau Bootis b имеет существенно большее магнитное поле и, соответственно, более высокую концентрацию плазмы в области генерации радиоизлучения при близком отношении плазменной и циклотронной частот. Вследствие более высокого магнитного поля, радиоизлучение в магнитосфере Tau Bootis b имеет более высокую частоту. Амплитуда такого радиоизлучения в магнитосфере Tau Bootis b, которое может быть детектировано на Земле имеющимися инструментами, существенно (на порядок и более) превышает амплитуду АКР в магнитосфере Земли.

Указанные различия приводят к следующим особенностям резонансного взаимодействия. Во-первых, расстояние между областями резонанса (как в абсолютных единицах, так и в единицах длины волны) в магнитосфере Tau Bootis b много больше, чем в магнитосфере Земли. Из этого следует, что пакеты реалистичной длительности в магнитосфере Tau Bootis b, в отличие от магнитосферы Земли, для большей части резонансных энергий охватывают только одну зону резонансного взаимодействия. Во-вторых, вследствие высокой амплитуды, для большей части резонансных энергий взаимодействие в обеих зонах резонанса будет существенно нелинейным, в то время как в магнитосфере Земли сильная нелинейность возможна только в резонансной зоне, расположенной на большей высоте.

В свою очередь, сильная нелинейность приводит к более важной роли эффектов захвата частиц полем волны. При взаимодействии с короткими пакетами эффекты захвата могут приводить к значительному (от 10 до 100 %) ускорению частиц в широком диапазоне энергий от десятков до сотен килоэлектронвольт.

Именно эта ситуация имеет место при параметрах плазмы и магнитного поля, соответствующих современным представлениям о магнитосфере экзопланеты Tau Bootis b. Таким образом, в данной работе продемонстрирована возможность нелинейного ускорения энергичных (10-500 кэВ) электронов в магнитосфере этой экзопланеты полем ее радиоизлучения с набором энергии до 100 % по отношению к начальной энергии.

ОТКЛИК ПЛАЗМЕННОГО МАГНИТОСФЕРНОГО МАЗЕРА НА АТМОСФЕРНЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ

Савина О.Н. [1], **Беспалов П.А.** [2]

[1] *НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия, onsavina@mail.ru*
[2] *ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия*

Во многих случаях плазменный магнитосферный мазер (ПММ) в утренней и дневной субавроральной магнитосфере представляет собой высокодобротную колебательную систему, ответственную за возбуждения квазипериодических электромагнитных излучений ОНЧ диапазона с периодами повторения спектральных форм 30-300 с. Относительно слабые внешние воздействия могут повлиять на работу ПММ при выполнении двух условий. Во-первых, чтобы быть резонансным внешнее воздействие должно иметь подходящий период. Во-вторых, чтобы влиять на полное усиление свистовых излучений при их прохождении магнитосферного резонатора внешнее воздействие должно менять инкремент циклотронной неустойчивости в вершине магнитной трубки или добротность магнитосферного резонатора. Заметно изменять инкремент циклотронной неустойчивости могут геомагнитные пульсации сжатия, имеющие переменную продольную компоненту магнитного поля. Добротность магнитосферного резонатора меняется как за счет модификации ионосферы пульсирующими потоками высыпающихся частиц, так и за счет инфразвуковых атмосферных возмущений. Для естественных атмосферных источников инфразвуковых возмущений с частотами выше частоты Бранта-Вяйсяля и горизонтальными масштабами порядка 100 км проведены модельные расчеты глубины модуляции плотности энергии электромагнитных волн в трубке магнитного поля. Полученные результаты важны для объяснения свойств квазипериодических ОНЧ излучений, не связанных с геомагнитными пульсациями.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 22-22-00397.

ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ НА КВАЗИПАРАЛЛЕЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЕ МАРСА ПО ДАННЫМ MAVEN

Ким К.И., **Шувалов С.Д.**

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

В соответствии с различной ориентацией межпланетного магнитного поля (ММП) головная ударная волна может быть либо квазипараллельной, либо квазиперпендикулярной. На квазипараллельной ударной волне значительная часть потока надтепловых ионов и электронов солнечного ветра отражаются от головной ударной волны и дрейфует вдоль силовых линий ММП, формируя протяженную и чрезвычайно турбулентную область, называемую форшоком.

В форшоке наблюдается большое количество нелинейных плазменных явлений. В данной работе мы проводим исследование плазменных структур в форшоке Марса по данным миссии Mars Atmosphere and Volatile Evolution (MAVEN). Мы используем данные ионного спектрометра STATIC и магнетометра MAG для анализа угловых распределений потока ионов разных масс и вычисления характеристик локального магнитного поля. Мы показываем, что наблюдаемые плазменные структуры согласуются с наблюдениями магнитными структурами с большой амплитудой магнитного поля (Short Large-Amplitude Magnetic Structures / SLAMS), часто наблюдаемых в области форшока у планет Солнечной системы с собственным магнитным полем и без. Также вычислено магнитное число Маха для анализа динамики потока солнечного ветра в области наблюдаемых структур. Анализ показывает, что магнитные структуры формируются вследствие развития ионно-циклотронного резонанса между ультранизкочастотных ми волнами, распространяющихся вдоль ММП, и отраженными ионами H^+ солнечного ветра, ионами O^+ и O_2^+.

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 21-42-04404 “Венера и Марс в потоке солнечного ветра. Сравнительный анализ”.

СИСТЕМА ВК: ДИНАМИКА НЕОДНОМЕРНЫХ СОЛИТОНОВ В СРЕДАХ СО СТОХАСТИЧЕСКИМИ ФЛУКТУАЦИЯМИ ВОЛНОВОГО ПОЛЯ (ТЕОРИЯ, ПРИЛОЖЕНИЯ)

Белашов В.Ю., Белашова Е.С., Харшиладзе О.А.

КФУ, г. Казань, Россия, vybelashov@yahoo.com

Аналитически и численно изучается динамика неодномерных солитонов в комплексных сплошных средах при наличии стохастических колебаний волнового поля, которая описывается обобщенными уравнениями системы Белашова-Карпмана (ВК) [1, 2], включающей классы обобщенных уравнений Кадомцева-Петвиашвили (GKP) и нелинейного уравнения Шредингера (GNLS). В своих исследованиях мы учитывали обобщения, относящиеся к различным комплексным физическим средам, включая космическую плазму, атмосферу, гидросферу, оптические волноводы и другие комплексные диспергирующие среды, где могут присутствовать стохастические флуктуации волнового поля, а также имеют место дисперсионные эффекты высшего порядка, влияние диссипации и неустойчивостей различного типа.

В докладе представлены результаты исследования влияния гауссова шума на структуру, устойчивость и динамику взаимодействия неодномерных нелинейных волн и солитонов, когда волны и солитоны деформируются в процессе распространения, приобретая осциллирующую волновую структуру [3]. Анализ устойчивости решений основан на изучении трансформационных свойств гамильтонианов соответствующих систем [4]. Структура возможных неодномерных решений и их столкновительное взаимодействие изучается численно. Представленный в докладе материал представляет собой как ранее известные, так и новые оригинальные результаты, полученные авторами, а также некоторые обобщения теории нелинейных волн и солитонов, распространяющихся в комплексных сплошных диспергирующих средах в присутствии стохастических флуктуаций волнового поля. Представлены также некоторые из исследованных авторами приложений полученных результатов в реальных физических средах.

Настоящая 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. Работа была поддержана Национальным научным фондом Грузии им. Шота Руставели (SRNF) (грант № FR17 252).

1. Belashov V.Yu., Belashova E.S., Kharshiladze O.A. // Adv. Space Res. 2018. V. **62**. Iss. **1**. P. 65.
2. Belashov V.Yu., Belashova E.S. // J. Astrophys. Aerospace Techn. 2019. V. **7**. P. 20.
3. Belashov V.Yu., Belashova E.S., Kharshiladze O.A. // J. Lasers, Optics & Photonics. 2020. V. **7**. N **6**. P. 4.
4. Белашов В.Ю. // Докл. АН СССР. 1991. Т. 320. № 1. С. 85.

КИНЕТИЧЕСКИЕ АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ ВБЛИЗИ ДИССИПАТИВНОГО СЛОЯ

Власов А.А., Леонович А.С., Козлов Д.А.

ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия, a.vlasov@mail.iszf.irk.ru

Исследована пространственная структура кинетических альфвеновских волн вблизи диссипативного слоя. В диссипативном слое происходит изменение типа дисперсии кинетических альфвеновских волн: от «холодной», при которой характерная поперечная длина волны (поперек магнитных оболочек) определяется скиновой длиной электронов плазмы, к «тёплой», при которой длина волны определяется ларморовским радиусом ионов.

Характерная поперечная длина кинетической альфвеновской волны в диссипативном слое комплексная, что обусловлено сильной диссипацией при взаимодействии с электронами фоновой плазмы.

Рассмотрены особенности фазовых сдвигов между поперечными компонентами электромагнитного поля альфвеновских колебаний. Сдвиг фаз может использоваться для идентификации типа альфвеновских волн, наблюдаемых на спутниках в окрестности диссипативного слоя.

Поглощение энергии альфвеновских волн в диссипативном слое может приводить к формированию потока электронов (с энергиями 2-5 эВ) в ионосферу и инициировать здесь красные дуги полярных сияний. Предложена аналитическая формула для определения плотности направленного к ионосфере потока электронов и потока переносимой ими энергии [1].

1. Leonovich, A. S., Kozlov, D. A., & Vlasov, A. A. (2021). Kinetic Alfven waves near a dissipative layer. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, e2021JA029580. https://doi.org/10.1029/2021JA029580

АЛЬФВЕНОВСКИЕ ВОЛНЫ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ БАУНС-ДРЕЙФОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ В КОЛЬЦЕВОМ ТОКЕ

Магер О.В.

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

Представлены результаты исследования полоидальных колебаний диапазона Pc4-5, зарегистрированных спутниками миссии THEMIS в ночной магнитосфере, на L~7.3-6 R_E [1]. Три спутника последовательно с интервалом около 30-ти минут при прохождении области кольцевого тока регистрировали колебания в магнитных и электрических полях. По данным спутника THA одновременно регистрировались основная и вторая гармоника полоидальных альфвеновских волн на частотах около 7 мГц и 18 мГц, соответственно. Спутники THD и THE зарегистрировали только вторую гармонику полоидальной альфвеновской волны, а также модуляции потоков протонов с энергиями около 50 кэВ на частоте гармоники.

Для волны второй гармоники азимутальное волновое число m = -54 было оценено с использованием фазовых задержек колебаний потоков протонов с разными гирофазами. Отрицательное значение указывает на то, что волна распространялась на запад, при этом азимутальная длина волны составляла около 0.8 R_E. Показано, что волна находилась в баунс-дрейфовом резонансе с протонами 46 кэВ и генерировалась из-за резонансной неустойчивости, вызванной неравновесным распределением протонов кольцевого тока со значительным направленным к Земле пространственным градиентом при резонансной энергии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-55-53009.

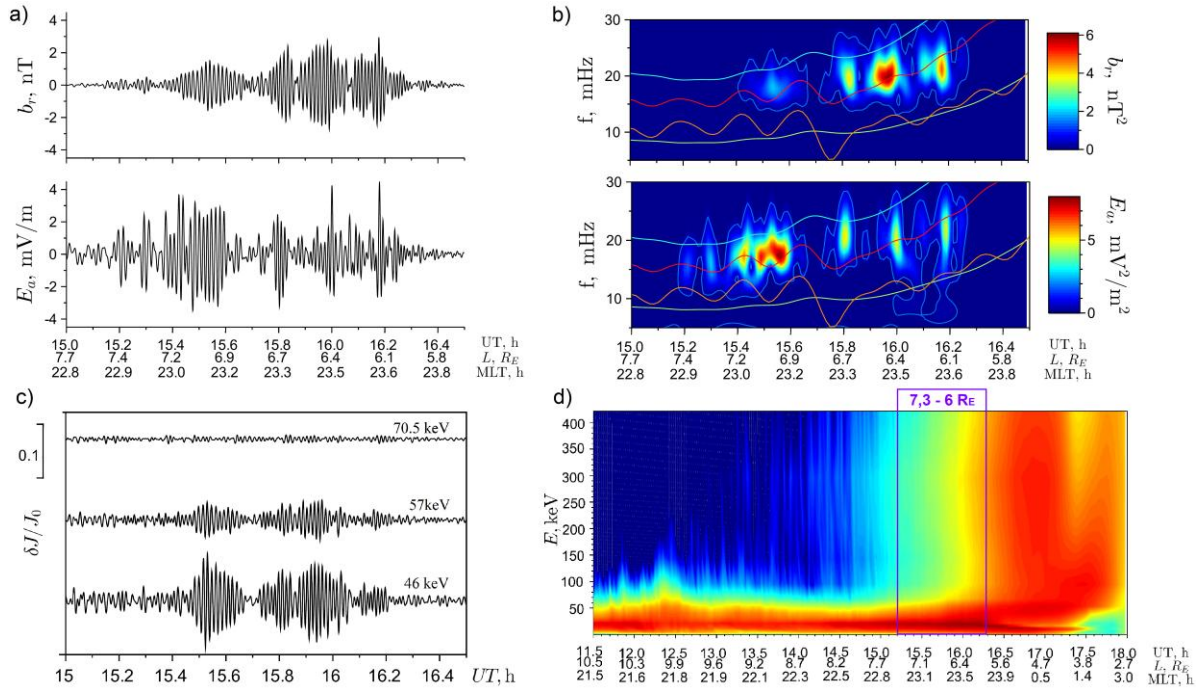


Рисунок. По данным спутника THD показаны: (a) - колебания радиальной b_r компоненты магнитного и азимутальной E_a компоненты электрического полей, (b) - их динамические спектры, цветные линии на спектрах - рассчитанные собственные альфвеновские частоты, (c) – колебания потоков протонов $\delta J/J_0$ с энергиями от 46 кэВ до 70.5 кэВ, (d) - потоки протонов в диапазоне энергий от 1 до 450 кэВ (7,3-6 R_E – область локализации колебаний).

1. Mager O.V. // J. Geophys. Res, 2021, V. 126, e2021JA029241.

ВОЛНОВАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ, КАК ФИЗИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС, ПОРОЖДАЮЩИЙ КРАСНЫЕ ДУГИ С ЭКСТРЕМАЛЬНЫМИ ЗНАЧЕНИЯМИ ИНТЕНСИВНОСТИ СВЕЧЕНИЯ 20-150 КР

Халипов В. Л.(1), Леонович А.(2) С., Сайбек Д.(3)

(1) ИКИ РАН, Москва, Россия, khalipov@iki.rssi.ru
(2) ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия
(3) NASA/GSFC, Greenblt, MD, USA

На би-статическом радаре некогерентного рассеяния STARE выполнены измерения картины распределения электрических полей альвеновских волн PC-5(Walker, Nature, vo. 273, 22 June, 1978). Структура имеет долготную протяженность несколько тысяч километров и широтную протяженность - 250 км. Электрическое поле волны имеет очень большую величину 50 мВ/метр, а сопутствующая магнитная вариация равна 70 нТ. Периоды волны меняются и охватывают диапазон 5-14 минут. На Рис.1 приведена магнитограмма обсерватории Иркутск за 8 июля 1958 года, когда визуально наблюдалась красная дуга очень высокой интенсивности. Наблюдаются пакеты волновых колебаний магнитного поля очень большой амплитуды. Если соотнести величину этих колебаний с измерениями радара STARE, то нижняя оценка дает величину электрического поля 370 мВ/м. Это вихревые электрические поля альвеновских или быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн. Выполненные расчеты (Rees et al., Pl. Space Sci., 11, 45-56, 1963). показывают, что фрикционный разогрев электрическим полем 100мВ/м генерирует красную дугу интенсивностью 5 кР. Сделаем предварительные оценки по имеющимся измерениям. В электрическом контуре вихревое электрическое поле Альвеновской волны (E_a) совершает работу E_a^2/R, где R омическое сопротивление в линии контура. Это электрическое поле создаст разогрев в 16 раз больший по сравнению с полем 100 мВ/метр и, соответственно, свечение красной линии возрастает до 90 кР, что, видимо и наблюдалось 8 июля 1958 года. Hasegawa and Mima (JGR, 1978), Leonovich et al. (JGR, 2021) предложили механизм, связанный с возможностью полного поглощения энергии кинетических альвеновских волн в диссипативном слое, расположенном в окрестности плазмопаузы. Было показано, что широкополосные кинетические альвеновские волны с амплитудой 7 нТ способны генерировать направленные в ионосферу потоки над тепловых электронов (с энергиями ~2эВ) с плотностью энергии ~0.4 эрг/(см^2·с). Оценки потоков электронов, соответствующие наблюдаемым амплитудам колебаний электромагнитного поля на магнитограмме, дают значения в диапазоне (5-50) эрг/(см^2·с).

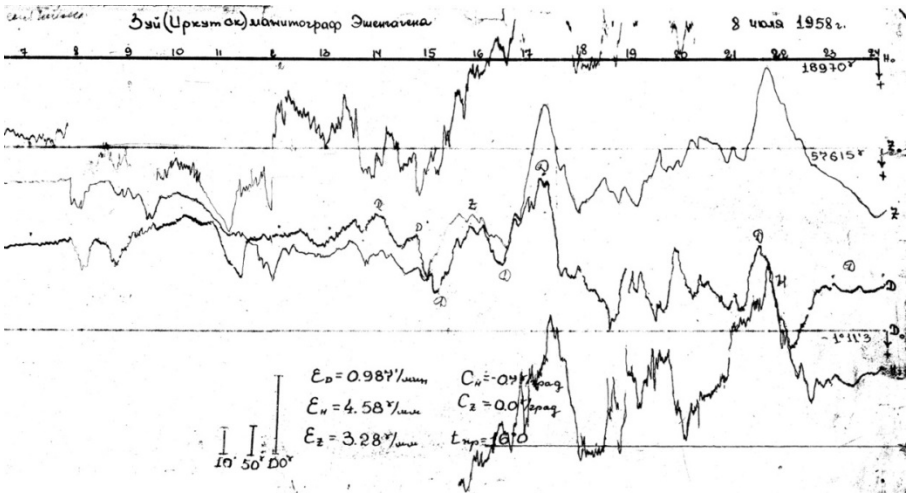


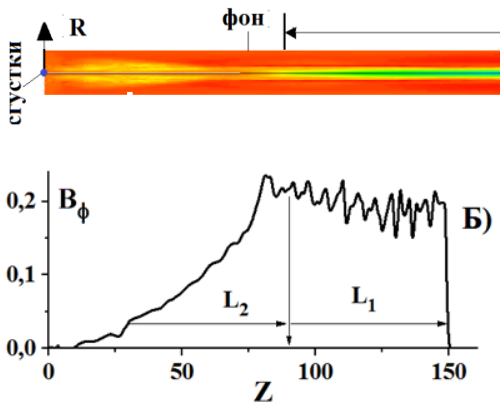
Рис.1 Магнитограмма обсерватории Иркутск за 8 июля 1958 года при наблюдении красной дуги очень высокой интенсивности.

ГЕНЕРАЦИЯ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ПРИ ЧИСЛАХ МАХА МНОГО МЕНЬШЕ ЕДИНИЦЫ

Тищенко В.Н., Березуцкий А.Г., Дмитриева Л.Р., Мирошниченко И.Б, Шайхисламов И.Ф.

ИЛФ РАН, г. Новосибирск, Россия, tvn25@ngs.ru

В ИЛФ СО РАН предложен метод генерации направленных потоков плазмы и электромагнитного излучения в силовой трубке замагниченной плазмы (далее – фон). С использованием расчетов на суперкомпьютерах показано, что в геомагнитной среде квазистационарные потоки могут создаваться при резонансе с фоном периодических сгустков лазерной или плазмы с химическим источником энергии, в которых предельно достижимое значение M_A ~ 0.1 ÷ 0.3. Энергия, интенсивность и длина крутильной альфвеновской волны максимальны при M_A~0.2. Волна содержит ~ 45 % энергии сгустков, резонансная частота повторения сгустков в ~2 раза меньше, чем при M_A~1, длина зависит от количества сгустков, предельное значение которых N ~ 20 ограничено понижением эффективности генерации волны. Энергия волны содержится в азимутальном магнитном поле и в моменте импульса плазмы фона, вращающейся в волне. Структура альфвеновской волны показана на рисунке. В медленную магнитозвуковую волну преобразуется ~ 10 % энергии сгустков, в струю плазмы сгустков ~ 35 %.



Момент импульса (А) и азимутальное магнитное поле (Б) альфвеновской волны, создаваемой 10 периодическими сгустками. Волна симметрична относительно точки Z=0, форма – цилиндрическая. Длина L_1 – зависит от количества сгустков и периода их повторения. L_2 - генерация после прекращения действия сгустков. Радиус зависит от энергии одного сгустка.

Таким образом, периодические сгустки низкотемпературной плазмы применимы для создания протяженных, энергоемких потоков момента импульса и сильных вариаций магнитного поля в геомагнитной среде. Оценки показывают, что метод применим также в лабораторных экспериментах на стенде КИ-1 и в лазерно-плазменных технологиях. Условия резонанса, предложенные авторами, позволяют масштабировать параметры сгустков (энергия, состав и скорость разлета плазмы) в зависимости от свойств фона. Аналогов в мире нет.

Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № 0243-2021-0003.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ КРУТИЛЬНЫХ АЛЬФВЕНОВСКИХ ВОЛН В ПЛАЗМЕ С ТЕПЛОВЫМ ДИСБАЛАНСОМ

Белов С.А., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, mr_beloff@mail.ru

Крутильные альфвеновские волны несжимаемы в линейном приближении. Вследствие этого они могут распространяться вдоль магнитных трубок на большие расстояния, перенося тем самым энергию из нижних слоев солнечной атмосферы в верхнюю. Однако в нелинейном режиме крутильные альфвеновские волны способны индуцировать сжимаемые возмущения плазмы такие, как возмущения продольной скорости, плотности и т.д. Если в плазме существуют неадиабатические процессы нагрева и радиационного охлаждения, которые уравновешивают друг друга в стационарных условиях и зависят от термодинамических параметров плазмы, то возмущение этих параметров, индуцированное волной, способно привести к нарушению баланса между этими процессами. Данное явление называется тепловым дисбалансом. Его существование в среде приводит к положительной или отрицательной обратной связи между возмущением и средой. В частности, наличие подобной обратной связи может приводить к усилению или затуханию магнитоакустических волн и дисперсии их фазовой скорости. Поскольку нелинейные крутильные альфвеновские волны способны индуцировать продольные возмущения плазмы, благодаря пондеромоторной силе, связанной с градиентом магнитного давления в волне, данные возмущение также могут испытывать влияние теплового дисбаланса.

Получены уравнения, описывающие генерацию возмущений продольной плотности и продольной скорости плазмы крутильной альфвеновской волной в случае теплового дисбаланса в приближении тонкой трубки. Для случая бегущих альфвеновских волн, показано, что тепловой дисбаланс не оказывает влияния на возмущение плотности. Для синусоидального альфвеновского драйвера получено аналитическое выражение для возмущения продольной скорости плазмы. Показано, что в случае теплового дисбаланса в решении появляется неосциллирующее слагаемое. Также наблюдается зависимость амплитуды осциллирующей части решения от частоты индуцирующей волны. Кроме того, осциллирующая часть оказывается сдвинутой по фазе по сравнению со случаем без теплового дисбаланса. Также произведено численное моделирование генерации продольного возмущения плазмы и сравнение с аналитическим решением для корональных параметров.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2020-0014 и АААА-А19-119083090053-9) и грантом РФФИ № 20-32-90018.

ВОЛНЫ С ЧАСТОТАМИ НИЖЕ ЭЛЕКТРОННОЙ ГИРОЧАСТОТЫ И $K||B_0$ В «ГОРЯЧЕЙ» ПЛАЗМЕ.

Н. С. Артеха[1,2], Д. Р. Шкляр[2]

[1]*Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики", г. Москва, Россия, natalya.arteha@mail.ru*
[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Резонансное взаимодействие волн и частиц - одно из важнейших явлений, определяющих спектры волн и динамику энергичных частиц космической плазмы. Это взаимодействие детально исследовано для случая, когда плазму можно с хорошей точностью разделить на две компоненты: холодную компоненту, определяющую дисперсионные свойства волн и не участвующую в резонансном взаимодействии, и энергичную компоненту, плотность которой мала по сравнению с плотностью холодной компоненты, так что она не влияет на дисперсию волн. Энергичные частицы участвуют в резонансном взаимодействии с волной, определяя её кинетическое бесстолкновительное затухание (или усиление в случае неустойчивой плазмы). Для вычисления декремента или инкремента волны функцию распределения энергичных частиц, как правило, полагают заданной аналитически, а также считают, что декремент или инкремент существенно меньше частоты. Эти условия, однако, не всегда оказываются выполненными. Например, в хвосте магнитосферы, где часто наблюдаются продольные свисты, разделение плазмы на холодную и энергичную компоненты достаточно условно, а инкременты волн не слишком малы по сравнению с частотой [1]. В настоящем докладе представлен подход к исследованию линейного резонансного взаимодействия свистовых волн, распространяющихся вдоль внешнего магнитного поля, с энергичными электронами, который позволяет снять указанные выше ограничения, и для волны с заданным волновым вектором найти действительную и мнимую часть частоты при произвольном соотношении между ними. При этом, функция распределения электронов, которая не разделяется на холодную и энергичную компоненты, может быть задана численно, например, на основе спутниковых измерений дифференциальных потоков частиц. Развитый подход проиллюстрирован на примерах вычисления инкремента (декремента) на основе измерений дифференциальных потоков электронов на спутниках Van Allen Probe-A и MMS.

1. Grigorenko, E. E., Malykhin, A. Y., Shklyar, D. R., Fadanelli, S., Lavraud, B., Panov, E. V., et al. (2020). Investigation of electron distribution functions associated with whistler waves at dipolarization fronts in the Earth's magnetotail: MMS observations. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 125, e2020JA028268. https://doi.org/10.1029/2020JA028268

ЭФФЕКТЫ ТЕПЛОВОГО ДИСБАЛАНСА В ПЛАЗМЕ С ГРАВИТАЦИОННОЙ СТРАТИФИКАЦИЕЙ

Рящиков Д.С., Завершинский Д.И., Молевич Н.Е.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, ryashchikovd@gmail.com

Процессы нагрева и охлаждения оказывают существенное влияние на МГД волны, распространяющиеся в солнечной короне. Их влияние традиционно описывается в рамках подхода, предложенного Филдом [1]. В этой модели рассматривается однородная среда, в которой в стационарном состоянии нагрев и охлаждение, зависящие от температуры и плотности среды, компенсируют друг друга. При появлении возмущения в среде возникает дисбаланс нагрева и охлаждения, который изменяет дисперсионные свойства МГД волны и приводит к возникновению так называемых тепловых неустойчивостей различных типов (или наоборот, возникновению устойчивого состояния). Однако в рамках данного подхода не учитывается структурированность плазмы, наблюдаемая в реальных средах.

В текущей работе учитываются одновременно эффекты теплового дисбаланса и гравитационной стратификации среды. В случае, когда влияние теплопроводности можно считать слабым или профиль температуры с высотой близок к линейному, в каждом сферическом слое должно выполняться условие теплового равновесия (равенство нулю функции тепловыделения), а также должно выполняться условие гидростатического равновесия. Одновременное выполнение этих условий означает, что профиль термодинамических параметров с высотой определяется видом функции тепловых потерь (или, что более точно, нулей функции тепловых потерь).

В данной работе была получена связь высотного профиля температуры, плотности и давления в зависимости от параметров функций нагрева и охлаждения, заданных в виде степенных функций плотности и температуры. Эта связь также открывает возможность для определения параметров неизвестной функции нагрева по известным высотным профилям термодинамических параметров. Кроме того, отмечено изменение акустической частоты отсечки в тепловыделяющей среде, что связано с изменением фазовой скорости распространения акустических волн в средах с тепловым дисбалансом.

Работа частично поддержана Министерством образования и науки (проекты FSSS-2020-0014, 0023-2019-0003).

1. Field G.B. // The Astrophysical Journal 1965. V. **142**. P. 531-567.

ДИНАМИКА БЫСТРЫХ И МЕДЛЕННЫХ МАГНИТОАКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В МАГНИТНОМ СЛОЕ С ТЕПЛОВЫМ ДИСБАЛАНСОМ

Агапова Д.В., Белов С.А., Молевич Н.Е., Завершинский Д.И.

Самарский университет, СФ ФИАН, г. Самара, Россия, agapovadaria2019@gmail.com

Неоднородность и неустойчивость солнечной атмосферы могут существенно повлиять на динамику и свойства волн. Так называемая, тепловая неустойчивость среды является следствием зависимости неадиабатических процессов, таких как нагрев и радиационное охлаждение, от температуры и плотности плазмы. В связи с этим, любое возмущение установившихся параметров среды может привезти к нарушению теплового баланса, которое в свою очередь окажет влияние на развитие самого возмущения [1]. Таким образом, при возникновении теплового дисбаланса возникает положительная или отрицательная обратная связь между возмущением и средой. Подобная обратная связь приводит к усилению или затуханию волн, а также к дисперсии их фазовой скорости. В то же время к дисперсии волн приводит наличие некоторых характерных размеров задачи, например, характерного размера магнитной структуры. Для того чтобы изучить совместное влияние данных факторов на дисперсионные свойства магнитоакустических (МА) волн, в данной работе нами был рассмотрен магнитный слой, состоящий из термически активной плазмы [2].

В ходе работы, с помощью теории возмущений, было получено дифференциальное уравнение, определяющее динамику двумерных возмущений. На основе предположения о сильном магнитном структурировании получены дисперсионные соотношения для изгибных и осесимметричных МА-волн, распространяющихся внутри плазменного слоя [3]. Данные уравнения были решены численно для типичных параметров солнечной короны. Из анализа численного решения было установлено, что медленные МА-волн подвержены более сильному затуханию за счет явления теплового дисбаланса. Фазовая скорость медленных волн подвержена существенному влиянию как дисперсии из-за конечной ширины плазменного слоя, так и дисперсии вызванной тепловым дисбалансом. Для параметров солнечной короны характерный временной масштаб, связанный с тепловым дисбалансом, находится в более низкочастотной области, чем временной масштаб, связанный с геометрией волновода. Таким образом, для медленных волн в области низких частот (длинных волн), основным источником дисперсии является нагрев/охлаждение плазмы. Полученные характерные масштабы диссипации медленных волн совпадают с периодами волн, наблюдаемых в солнечной короне. В то же время тепловой дисбаланс, вызванный процессами нагрева/охлаждения, не оказывает существенного влияния на быстрые МА-волны. Зависимость фазовой скорости от волнового числа, рассчитанные для идеальной плазмы и термически активной плазмы, практически идентичны. Таким образом, даже в неадиабатической плазме основным источником дисперсии фазовой скорости быстрых волн является геометрия волновода.

Работа выполнена при частичной финансовой министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Государственного задания (проект №FSSS-2020-0014), научно-исследовательским институтом (проект №0023-2019-0003) и РФФИ 20-32-900185.

1. Zavershinskii D.I., Kolotkov D.Y., Nakariakov V.M., Molevich N.E., Ryashchikov D.S. // Phys. Plasmas 2019, **26**, P. 082113.
2. van der Linden R.A.M., Goossens M. // Sol. Phys. 1991, **131**, C.79
3. Edwin P.M., Roberts B. // Sol. Phys. 1982, **76**, C. 239-259.

ФОРМИРОВАНИЕ И ПЕРЕСТРОЙКА ТОКОВЫХ СТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ РАЗЛЁТА ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ ПЛОТНОЙ В РАЗРЕЖЕННУЮ ПЛАЗМУ

Кочаровский Вл.В.[1], **Гарасёв М.А.**[1], **Нечаев А.А.**[1], **Степанов А.Н.**[1], **Кочаровский В.В.**[1,2]

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

Задача о формировании ударной волны и токовых структур (слоёв или филаментов) под образующимся неоднородным фронтом раздела, образованным покоящейся равновесной (холодной) плазмой и входящим в неё потоком неравновесной плазмой с горячими электронами, известна для многих ситуаций в космической плазме. Однако ряд особенностей перестройки токовых структур на определённой начальной стадии подобного переходного процесса, наблюдаемых или ожидаемых при взрывных явлениях в лазерной или астрофизической бесстолкновительной плазме, остаются мало исследованными, хотя и представляют несомненный интерес.

В докладе такого рода особенности исследованы для различных начальных значений концентраций и температур электронов и ионов налетающей и покоящейся плазмы. Приведены предварительные физические доводы, позволившие выделить те области параметров задачи, в которых либо только при достаточно большой, либо лишь при весьма короткой длительности впрыска плазмы с горячими электронами возможно образование достаточно сильных токовых структур и их дальнейшая значительная и довольно резкая перестройка. Анализ указанного явления, на которое ранее не обращалось должного внимания, основан на ряде проведённых детальных двумерных численных расчётах методом частиц в ячейках с использованием кода EPOCH.

Показано, что для выбранных параметров практически с самого начала процесса впрыска плазмы с горячими электронами начинается развитие неустойчивости вейбелевского типа и происходит формирование токовых слоёв (филаментов), ориентированных вдоль направления впрыска. Однако со временем при определённых условиях происходит анизотропное остывание влетающих горячих электронов (и в меньшей степени - ионов) и благодаря возникающей анизотропии распределения частиц по скоростям, в том числе с учётом перемешивания горячих и холодных частиц, характер вейбелевской неустойчивости меняется. В результате начинают довольно быстро развиваться по-другому ориентированные пространственные моды, которые в значительной области под фронтом ударной волны подавляют первоначально возникшие токовые структуры и создают по-новому ориентированные токовые слои (филаменты) или приводят к хаотизации всей токовой структуры, которая приобретает вид квазимагнитостатической турбулентности.

Установлены характерные особенности предсказанного явления, выявлены его пространственно-временные масштабы и определены типичные свойства возникающих токовых структур и согласованных с ними регулярных или турбулентных магнитных полей. Особое внимание уделено связи этих свойств с меняющейся неоднородной анизотропией распределения электронов по скоростям и перемешиванием горячей и холодной плазмы в широкой области под фронтом эволюционирующей ударной волны.

Моделирование переходной стадии формирования ударной волны и перестройки токовых слоёв (филаментов) под её фронтом при наличии постоянного или кратковременного потока горячих электронов и ионов проведено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение с ОИВТ РАН № 075-15-2020-785 от 23 сентября 2020 г.). Численные расчеты проводились с использованием ресурсов ЦКП ВР МСЦ РАН. Интерпретация, аналитические оценки и качественный анализ результатов выполнены в рамках гранта Фонда развития теоретической физики и математики "Базис" № 20-1-1-37-2.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИОННЫХ ПУЧКОВ С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Парамоник И.П., Дивин А.В., Зайцев И.В., Семенов В.С.

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия, igorparamonik@gmail.com

Взаимодействие плазмы солнечного ветра и магнитосферы Земли приводит к формированию токовых слоев, описывающихся в рамках кинетической теории бесстолкновительной плазмы. Токовые слои являются резервуаром магнитной энергии, высвобождающейся в ходе процесса магнитного пересоединения в кинетическую и тепловую энергию плазмы вместе с изменением топологии магнитных силовых линий. С точки зрения динамики частиц, магнитное пересоединение представляет собой комплекс механизмов ускорения, в результате действия которых генерируются направленные пучки частиц и, как следствие, формируются сложные функции распределения.

При наличии немаксвелловских функций распределения вопрос о делении энергии на кинетическую и тепловую становится нетривиальным. Стандартное определение массовой скорости и тепловой энергии, оперирующее с единственной популяцией, можно обобщить аналитически на случай с несколькими пучками [1]. Однако, тогда возникает вопрос, как в заданной точке пространства автоматически определить количество пучков и их параметры. Для выявления информации о пучках, генерируемых в процессе пересоединения, мы применяем алгоритм машинного обучения без учителя (Gaussian Mixture Model) к данным 2D3V симуляции, выполненной с помощью кинетического кода iPIC3D [2].

Мы уделяем особое внимание функциям распределения по скоростям для ионов, так как им передается большая часть выделенной магнитной энергии. Обнаружено, что внутри ускоренного пересоединенного потока средневзвешенная температура пучков существенно отличается от стандартной температуры, вычисленной как 2-й момент функции распределения. В частности, область параллельной анизотропии, рассматривающаяся как область сильного параллельного нагрева, на самом деле содержит пару встречных высокоэнергичных, но холодных продольных пучков. Различие параллельных температур в таком случае может достигать 1-2 порядков и объясняется наличием кинетической энергии пучков, учитываемой как часть тепловой энергии в определении стандартного 2-го момента. Таким образом, предлагаемый подход к разделению кинетической и тепловой энергий для немаксвелловских функций распределения предоставляет иной взгляд на нагрев бесстолкновительной плазмы и открывает новые возможности для изучения функций распределения.

1. Goldman M.V. et al. Multibeam Energy Moments of Multibeam Particle Velocity Distributions // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2020. – Т. 125. – №. 12. – С. e2020JA028340.
2. Markidis S. et al. Multi-scale simulations of plasma with iPIC3D // Mathematics and Computers in Simulation. – 2010. – Т. 80. – №. 7. – С. 1509-1519.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОЛН И ЧАСТИЦ ПРИ ОСОБЫХ УСЛОВИЯХ

Беспалов П.А.[1], **Савина О.Н.**[2]

[1]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, peter@ipfran.ru*
[2]*НИУ ВШЭ, г. Нижний Новгород, Россия*

В космической плазме наблюдаются электромагнитные излучения с дискретной структурой динамического спектра и очень высокой яркостной температурой. Это, например, импульсные излучения коричневого карлика TVLN 513-46546 на частотах 5-8 ГГц, гигантские всплески (extreme nanoshots) в главных радиоимпульсах пульсара в Крабе на частотах 0.4-5 ГГц, хоровые электромагнитные излучения в дневной магнитосфере Земли на частотах 1-5 кГц. Для объяснения условий возбуждения указанных излучений необходимо принимать во внимание реальные свойства среды и дисперсионные особенности волновых возмущений. Условия возбуждения этих излучений можно во многом объяснить с единых позиций в рамках *BPA* (Beam-Pulse-Amplifier) механизма усиления коротких электромагнитных импульсов с предельно высоким темпом, характерным для неустойчивости гидродинамического типа. Этот механизм обеспечивает формирование интенсивных быстро меняющихся излучений с дискретной структурой динамического спектра в плазме без существенной анизотропии функции распределения энергичных частиц. Теоретический анализ и численные расчеты показали возможность реализации особых условий взаимодействия на резонансе Черенкова для облака активных частиц, которые движутся вместе с коротким импульсом через область взаимодействия волн и частиц. В результате слабые шумовые импульсы с подходящей несущей частотой, поляризацией и углом волновой нормали могут резко усиливаться и трансформироваться в дискретные электромагнитные излучения в плазменных оболочках намагниченных коричневых карликов, нейтронных звезд и планет.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 20-12-00268.

ДИАМАГНИТНАЯ ОБЛАСТЬ В ЭЛЕКТРОННОМ КИНЕТИЧЕСКОМ НЧ ОПИСАНИИ

В.М. Губченко

ИПФ РАН, Нижний Новгород, Россия (ua3thw@appl.sci-nnov.ru)

Электромагнитная (э.м.) токовая система (ТС) с магнитодипольной и тороидальной компонентами, образованная в результате электростаического - квазипродольного сверхзвукового разлета и э.м. квазипоперечного разлета со сверхальвеновской скоростью плазмы от изотропного источника обобщенного импульса инжекции в замагниченную внешним магнитным (ВМ) полем плазму, создают диамагнитное облако/область (ДО) [1]. ДО характеризуется формированием высоких значений плазменного бета внутри облака и низкими значениями вне его, согласованные с диссипативным разрывом-прорывом, либо диамагнитным расталкиванием силовых линий исходного ВМ поля, приводящими к режимам слабой замагниченности не только ионов, но и электронов внутри ДО. ДО подобны островам электронного магнитного пересоединения (МП) и корональным выбросам массы (КВМ), сопряженными с разлетами плазмы относительно сторонних источников намагниченностей с неоднородным ВМ полем [2].

ДО мощный источник ускоренных индукционным э.м. полем эенргичных электронов и источник излучения МЗ и А МГД волн. Инжекция плазмы с высокой плотностью энергии/импульса (ВПЭИ) и достаточно разреженная фоновая плазма формируют открытую ТС с горячей бесстолкновительной плазмой, для которой- проводится электронное кинетическое описание.

Функции распределения электронов плазмы не только анизотропна, но и асимметрична (разлет), поэтому для определения э.м. структур в ДО характеризуется, помимо диамагнитного, особым аномальным скиновым масштабом в открытой ТС. Им соответствуют особые параметры э.м. добротности для плазмы разлета.

Анализ ламинарного разлета в условиях замагниченности ДО рассматривается в рамках развития магнито-ламинарного механизма (МЛМ) [3] с возможностью возбуждения не только МЗ моды и дипольной ТС, но и тороидальной компоненты ТС на основе возбуждения НЧ квазипоперечной обыкновенной моды [4]. Альтернативно МЛМ, при неламинарном разлете ДО рассматривается в рамках магнито-квазилинейного механизма (МКМ), работающего на индукционной моде (вейбелевской неустойчивости) в незамагниченной части ДО и на НЧ ее аналоге - квазипоперечной обыкновенной моде в замагниченной части ДО. В МКМ ДО это э.м. диффузионный контактный разрыв - «волна горения Стефана».

Работа выполнена в рамках Государственных заданий № 0030-2021-0002 и № 0030-2021-0015, и частично поддержана грантами РФФИ (№ 19-02-00704, № 20-02-00108).

1. D. Winske et al, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 2019, v. 5, a. 51, pp 1-14. DOI: 10.3389/fspas.2018.00051

2. V. M. Gubchenko, Geomagnetism and Aeronomy, 2020.Vol. 60, No. 7, pp 896-903, DOI: 10.1134/S0016793220070129DOI

3. V. Bashurin, A Golubev, V. Terekhin, J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1983, v.24, pp 614-622. DOI: 10.1007/BF00905870

4. Б.Н. Гершман, М.С. Ковнер, Изв. ВУЗ «Радиофизика», Т.1, №3. с.19-24, 1958.

О ПОЛЯРИЗАЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СВИСТОВЫХ ВОЛН ВБЛИЗИ ИОННОЙ ПЛАЗМЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Лундин Б.В.

ИЗМИРАН РАН, г. Москва, Россия, lundin.bv@gmail.com

Анализ ионного состава плазмы и определение ионной плазменной частоты существенны для оценок дисперсионных свойств электромагнитных волн на частотах вблизи нижнегибридного резонанса (НГР) и ниже. При загрязнении плазмы электроотрицательными примесями возможна и существенная модификация частотных зон прозрачности для волн регистрируемых космическими аппаратами.

Известно [1], что с уменьшением доли электронов среди переносчиков отрицательных зарядов, дополняемых менее подвижными отрицательными ионами, частота НГР как и частота ионной отсечки электронных свистовых волн растут в сторону значения ионной плазменной частоты. Если гирочастоты двух типов ионов существенно выше, чем у оставшихся типов (включая отрицательно заряженные частицы примесей), то в плазме умеренной плотности знание значений ионной плазменной частоты и двух наибольших из частот ионной отсечки позволяет восстановить показатель преломления электронных свистовых волн во всем диапазоне прозрачности [2]. В почти чисто ионной плазме частотный диапазон прозрачности сужается до малой окрестности ионной плазменной частоты, значение которой может оставаться близким к исходному, если удельный заряд образовавшихся отрицательных примесей / ионов (при адгезии электронов фона) достаточно мал [3].

Кроме зондовых измерений, дающих ненадежные оценки в плазме с отрицательными ионами, определить ионную плазменную частоту возможно при сканировании по частоте магнитных компонент принятых сигналов, а именно: при проходе частоты через значение локальной ионной плазменной частоты большая и малая оси эллипса поляризации магнитного поля квазиплоской волны поменяются местами, проходя через круговую поляризацию [4]. Эффект будет заметен в плазме умеренной плотности (к примеру, ниже ~ 4000 км над Землей) и охарактеризует плазменное окружение на масштабах не меньших длины волны (обширнее «области сбора зондовых токов»).

Подобная диагностика теоретически допускает исключение вклада массива паразитных волн с множественными ориентациями плоскостей поляризации их магнитного поля. Фильтрация возможна при отсутствии корреляции между составляющими паразитного массива за времена накопления полного сигнала для последующей обработки с помощью «спектральных матриц». А именно, возможно разделение аксиально изотропного (по внешнему магнитному полю) шума и оставшегося «полезного» квазиплоского сигнала [5].

В случае же регистрации магнитосферно отраженных (MR) свистов как «полезных» интенсивных квазиплоских сигналов, выявление ориентации их плоскостей поляризации облегчается тем, что структура дипольного геомагнитного поля (ДГП) «способствует» преимущественной локализации волновых векторов квазиплоских MR волн в плоскости ДГП с ориентацией в сторону больших L-оболочек [6].

1. Lundin B.V., Krafft C. // Ann. Geophys. 2008. V. **26**. P. 1605.
2. Lundin B.V., Krafft C. // Phys. Plasmas 2009. V. **16.** P. 052104.
3. Lundin B.V., Krafft C. // Phys. Plasmas 2011. V. **18.** P. 102114**.**
4. Krafft C., Lundin B.V. // Ann. Geophys. 2010. V. **28**. P. 2237.
5. Voyevudskiy V.P., Lundin B.V. // Geomagn. Aeron. 1984. V. **24**. P. 47.
6. Lundin B.V., Krafft C. // J. Geophys. Res. 2001. V. **106.** P. 25643.

ТОКОВЫЕ СЛОИ В ТРЕХМЕРНЫХ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ С *X*-ЛИНИЕЙ И GUIDE FIELD – ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ И ОТЛИЧИЯ ОТ КЛАССИЧЕСКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ

Франк А.Г.

ИОФ РАН, г. Москва, Россия, annfrank@fpl.gpi.ru

Обсуждаются характерные особенности структуры токовых слоев, формируемых в плазме в трехмерных (3D) магнитных конфигурациях с ***X***–линией, в присутствии продольной компоненты магнитного поля, направленной вдоль ***X***–линии (guide field). Магнитные поля в космических объектах, как правило, трехмерные. Поэтому изучение в лабораторных экспериментах особенностей токовых слоев, развивающихся в 3D конфигурациях, имеет существенное значение для проблемы магнитного пересоединения.

Среди многообразия 3D магнитных конфигураций наибольший интерес представляют конфигурации с особыми линиями ***X***-типа, что обусловлено их ролью в формировании токовых слоев. Простейшую магнитную конфигурацию с ***X***–линией на оси $0z$ можно представить в виде: $\boldsymbol{B} = \{h \cdot y; h \cdot x; B_Z^0\}$, где h – градиент магнитного поля в плоскости (x,y), и B_Z^0 – однородная продольная компонента. Формирование токового слоя осуществляется при возбуждении в плазме тока J_Z, направленного параллельно ***X***–линии.

Структурные особенности токовых слоев анализируются в докладе на основе экспериментальных результатов, которые были получены с помощью установки ТС–3D (ИОФ РАН). Эксперименты проводились в различных условиях, в том числе при разных соотношениях между градиентом h и продольной компонентой B_Z^0 (см. [1] и цитированную там литературу).

Установлено, что в процессе развития токового слоя происходит усиление guide field в пределах слоя, что обеспечивается токами плазмы, которые протекают в поперечной плоскости по отношению к основному току в слое. В результате структура электрических токов в слое становится трехмерной.

Показано, что с увеличением начального значения B_Z^0 уменьшается степень сжатия в слой, как электрического тока, так и плазмы, что обусловлено изменением баланса давлений в слое при появлении в нем избыточного продольного поля.

Наблюдавшаяся деформация плазменных токовых слоев, а именно, появление асимметричных и изогнутых слоев в 3D магнитных конфигурациях, возникает при возбуждении токов Холла и их взаимодействии с продольной компонентой магнитного поля.

Показано, что формирование токовых слоев в 3D магнитных конфигурациях с ***X***–линией возможно в достаточно широком, но ограниченном диапазоне начальных условий. При этом наиболее существенный параметр, который определяет возможность образования токового слоя – это градиент поперечного магнитного поля h, который должен превышать некоторую критическую величину, тем большую, чем больше напряженность guide field.

1. Франк А.Г. // Успехи Прикладной Физики 2021. Т. 9. С. 464.

ТОНКИЕ ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ТОКОВЫЕ СЛОИ МГД-ПРИРОДЫ В ВЕРХНЕЙ ХРОМОСФЕРЕ СОЛНЦА

Алексеева Л.М.[1], **Кшевецкий С.П.**[2]

[1]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, l.m.alekseeva@yandex.ru;* [2]*БФУ, г. Калининград, Россия*

По современным оценкам примерно 95 % магнитного потока, поступающего через фотосферу в хромосферу, не доходит до короны. Так что верхняя хромосфера заполнена разнообразными, в основном, горизонтальными магнитными полями. Пусть в начальный момент близко друг к другу находятся два одинаковых, но разнонаправленных магнитных поля, магнитное давление в которых всюду сбалансировано с газовым. Мы моделируем явления, возникающие при $\beta>1$ в ходе дальнейшей эволюции поля и плазмы. Для этого (в предположении, что все физические величины неизменны вдоль силовых линий поля, а сами линии представляют собою горизонтальные параллельные прямые) численно решается 2D задача с начальными условиями для полностью самосогласованной нелинейной системы столкновительных МГД уравнений, где учтены электрическое сопротивление, теплопроводность и эффект Холла. (Заметим, что получаемый класс решений не имеет отношения к процессу пересоединения, поскольку при последнем скорость вещества неодинакова вдоль линии поля.) Используемый алгоритм позволяет продолжать расчеты, несмотря на развитие в ходе совместной эволюции поля и плазмы мелкомасштабной турбулентности, фронтов и т. п., поскольку в нем предусмотрен автоматический переход к вычислениям с помощью аппарата обобщенных функций. Поэтому численный эксперимент дает нам возможность видеть не только начальную стадию исследуемой ко-эволюции.

Было установлено, что в контактной зоне разнонаправленных хромосферных магнитных полей при отсутствии эффекта Холла может развиваться показательная цепь событий: формируется тонкий токовый слой, затем он преобразуются в правильную крестообразную транзиентную фигуру, на фоне ее потом проявляют себя процессы взрывного (вспышечного) характера [1, 2]. Как известно из решения аналогичной системы уравнений для лабораторной физики плазмы, присутствие эффекта Холла вносит усложнения в картину явлений, порождая специфические неоднородности и «взрывы» [3] . Поэтому, исследуя роль эффекта Холла в верхней хромосфере Солнца (где с увеличением высоты его роль становится все более значимой из-за нарастающей разреженности вещества), мы начали со сравнительно простого случая слабого магнитного поля ($\beta=7.5$), когда вносимые эффектом Холла явления не столь разнообразны и динамичны. Были рассмотрены поля с вертикальной контактной зоной между ними (разнонаправленные магнитные поля, расположенные рядом по горизонтали). Оказалось, что в ходе ко-эволюции поля и холловской плазмы ток контактной зоны, направленный *вверх,* становится тонким токовым слоем при большем разнообразии геометрий начальных магнитных конфигураций, чем это происходит в отсутствии эффекта Холла; причем образовавшись, он дольше существует [3]. Однако аналогичное моделирование, проведенное в настоящей работе при начальном токе контактной зоны, направленном *вниз*, показало, что под влиянием эффекта Холла такой ток, наоборот, начнет расплываться и деградировать. Это приводит к выводу, что в верхней хромосфере, куда постоянно поступают снизу разнообразные магнитные поля, должны чаще встречаться тонкие токовые слои с током, текущим в сторону короны, чем с током, текущим из короны.

1. Алексеева Л.М., Кшевецкий С.П. // Астрофиз. бюлл. 2011. Т. **66.** С. 76.
2. Alekseeva L.M., Kshevetskii S.P. // Solar Phys. 2015. V. **290.** P. 3295.
3. Брушлинский К.В., Морозов А.И.// Вопросы теории плазмы 1974. В. **8**. С. 88.
4. Алексеева Л.М., Кшевецкий С.П. // Геомагн. и аэроном. 2019. Т. **59**. С. 547.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЮПИТЕРА

О.В. Мингалев[1], П.В. Сецко[1], М.Н. Мельник[1], А.В. Артемьев[2]

[1] *Полярный геофизический институт, Апатиты, mingalev_o@pgia.ru*

[2] *Институт космических исследований РАН, Москва*

Известные данные аппаратов Galileo и Juno показывают, что в хвосте магнитосферы Юпитера имеется тонкий токовый слой (ТТС), в котором помимо протонов присутствуют тяжелые горячие ионы кислорода O^+ и серы S^+. Эти ионы появляются в магнитосфере Юпитера в результате регулярных мощных вулканических выбросов диоксида серы SO_2 на ближайшем к Юпитеру его спутнике Ио, средний радиус орбиты которого примерно равен $6R_J$, где $R_J \approx 11R_E$ – радиус Юпитера, а R_E – радиус Земли.

ТС в хвосте магнитосферы Юпитера по значениям магнитного поля похож на ТС ближнего хвоста магнитосферы Земли. Тангенциальная компонента магнитного поля B_τ выше и ниже ТС, и его нормальная компонента B_n имеют характерные значения соответственно $B_{\tau 0} = 20$ нТл и $B_n = 1$ нТл. Характерные значения температуры ионов серы S^+, ионов кислорода O^+, протонов и электронов составляют соответственно $T_S \sim 40-60$ кэВ, $T_O \sim 20-40$ кэВ, $T_p \sim 5-20$ кэВ и $T_e \approx 1$ кэВ. Концентрации ионных компонент лежат в пределах $n_\alpha \approx 0.01-0.05$ см$^{-3}$. Полутолщина ТС в хвосте Юпитера L сравнима с его радиусом: $L \sim (0.2-0.5)R_J \sim 2-5R_E$. Для каждой ионной компоненты отношение продольной скорости встречных потоков $V_{D\alpha}$ на краях ТС к тепловой скорости $V_{T\alpha}$ ориентировочно лежит в пределах $\delta_\alpha = V_{D\alpha}/V_{T\alpha} \approx 0.25-4$.

Для исследования поперечного пространственного масштаба ТТС в хвосте магнитосферы Юпитера с помощью численной модели получены его стационарные симметричные конфигурации для нескольких вариантов образующих ТС встречных продольных потоков ионов. Из результатов расчетов можно сделать следующие выводы.

Если рассматриваемый ТС образован только потоками горячих ионов серы S^+, то он имеет наибольшую полуширину $L \approx (0.3-0.35)R_J \approx (3-3.5)R_E$, а также наименьшие максимальные значения плотности тока и концентрации в центре ТС $j_{S\max} \approx 1.5$ нА/м и $n_{S\max} \approx 0.024$ см$^{-3}$. Если ТС образован только потоками горячих ионов кислорода O^+, то он имеет меньшую полуширину $L \approx 0.25R_J \approx 2.5R_E$, а также большие максимальные значения плотности тока и концентрации в центре ТС $j_{O\max} \approx 3$ нА/м и $n_{O\max} \approx 0.048$ см$^{-3}$. Если ТС образован только потоками протонов, то он имеет наименьшую полуширину $L \approx 0.04R_J \approx 0.4R_E$, а также наибольшие максимальные значения плотности тока и концентрации в центре ТС $j_{O\max} \approx 16$ нА/м и $n_{O\max} \approx 0.095$ см$^{-3}$.

Таким образом, наблюдаемым масштабам ТС в хвосте магнитосферы Юпитера соответствуют ТС, в который основной вклад в полный ток через ТС дают горячие ионы серы S^+.

НАБЛЮДЕНИЕ СВЕРХТОНКИХ ТОКОВЫХ СЛОЕВ СПУТНИКАМИ MMS В ХВОСТЕ ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЫ

Леоненко М.В., Григоренко Е.Е., Зелёный Л.М., Малова Х.В., Малыхин А.Ю., Попов В.Ю.

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

Флэппинг токового слоя (ТС), связанный с распространением высокоскоростных потоков плазмы, позволил впервые наблюдать сверхтонкие токовые слои (СТС) в плазменном слое геомагнитного хвоста Земли. В течение рассматриваемого интервала было обнаружено 111 пересечений нейтральной плоскости токового слоя. В 95 пересечениях наблюдались СТС с плотность тока выше 20 нА/м^2. Полутолщина СТС (L_{CTC}) составляет порядка нескольких гирорадиусов тепловых электронов. В ряде СТС параметр адиабатичности (κ_e) оказался ниже 1 для сверхтепловой популяции электронов (> 1 кэВ).

Впервые показано, что электрический ток в подобных СТС переносится размагниченными электронами (κ_e <1) и равновесное состояние СТС поддерживается градиентом недиагональных членов тензора давления размагниченной электронной популяции. В этом смысле, физика, лежащая в основе формирования СТС на электронных масштабах, аналогична механизму формирования ТС на ионных масштабах с квазиадиабатическими ионами. Низкоэнергетическая популяция электронов, которые являются замагниченными, также крайне важна, т.к. она поддерживает стабильность СТС и позволяет наблюдать их как квазистационарные структуры. Мы сравнили наблюдаемые значения полутолщины СТС (L_{CTC}) с полутолщинами (λ), предсказанными новой кинетической теорией, учитывающей связь между тонким токовым слоем на ионных масштабах и сверхтонким токовым слоем на электронных масштабах. Мы обнаружили соответствие между указанными значениями: $L_{CTC} \sim (0.3\text{-}1)\ \lambda$. Дальнейшее развитие теории, учитывающее динамику размагниченных электронов, может обеспечить лучшее соответствие наблюдений и теории.

В ходе наблюдений было показано, что СТС часто наблюдается при сильных биполярных вариация нормальной компоненты магнитного поля B_z. Подобные вариации могут свидетельствовать о конечных радиальных размерах СТС вдоль оси X. Таким образом, предполагается, что наблюдаются множество СТС, локализованных в магнитных островах, которые движутся совместно с быстрыми потоками. Нами был предложен метод оценки радиальных размеров СТС, который был применен к исследуемым данным. По полученным результатам радиальный размер подобных структур составляет порядка радиуса Земли R_E.

Работа финансируется Российским научным фондом (#20-42-04418).

ЗВЕЗДНОЕ ДИНАМО И КОНФИГУРАЦИЯ ТОКОВЫХ СЛОЕВ

Соколов Д.Д., Малова Х.В., Маевский Е.В., Попов В.Ю., Юшков Е.В.

МГУ, ИЗМИРАН, ИКИ РАН, г. Москва, Россия, sokoloff.dd@gmail.com

Происхождение токовых слоев в околосолнечном пространстве в конечном счете связано с распространением волны квазистационарного магнитного поля во внутренних слоях Солнца. Эта волна вызвана работой солнечного динамо. В зависимости от распределения и амплитуды источников работы динамо в конвективных оболочках звезд могут возбуждаться магнитные поля, строение которых существенно отличается от солнечного. В частности, для нихз волна активности может двигаться не к экватору, а к полюсу. Мы выясняем, какова в этом случае ожидается конфигурация токовых слоев в пространстве, окружающем звезду.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ НАД ПЕТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ АКТИВНОЙ ОБЛАСТИ СОЛНЦА

Мерзляков В.Л.

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

Проведена оценка энергетической мощности токового слоя над вершинами системы петель активной области Солнца. Рассмотрена модель токового слоя как магнитной особенности Х-типа, которая формируется зонами локально усиленного магнитного поля супергрануляционной конвекцией. Ток течёт в окрестности этой Х-особенности под действием вихревого электрического поля. Установлено, что режим протекания тока является турбулентным. Турбулентный режим возникает из-за неустойчивости, вероятнее всего, Бунемановской. Расчёты показали, что интенсивность нагрева солнечной короны токовым слоем над активной областью не превышает ~10^3 эрг/сек $см^2$. Эта величина на 2 порядка меньше, чем стационарный нагрев солнечной короны.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОКОВОГО СЛОЯ БЛИЖНЕГО ХВОСТА МАГНИТОСФЕРЫ, ОБРАЗОВАННОГО ИОНОСФЕРНЫМИ ИОНАМИ КИСЛОРОДА

О.В. Мингалев[1], П.В. Сецко[1], М.Н. Мельник[1], И.В. Мингалев[1], Х.В. Малова[2,3], А.М. Мерзлый[3], Л.М. Зелёный[3]

[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*

Из экспериментальных данных известно, что на предварительной фазе суббури в геомагнитно активных условиях наблюдается повышение вклада ионов кислорода в полную концентрацию ионов в плазменном слое от значений порядка 1-2% перед суббурей до значений свыше 50%. В околоземной магнитосфере на силовых линиях, выходящих из высокоширотной области ионосферы, были обнаружены потоки ионов кислорода, направленные от Земли в хвост. Присутствие токонесущих ионов кислорода было неоднократно обнаружено при пересечениях токового слоя (ТС) ближнего хвоста аппаратами миссии CLUSTER. Недавно по измерениям миссии THEMIS было показано, что в плазменном слое наблюдаются направленные в ближний хвост продольные потоки ионов кислорода O^+ ионосферного происхождения, а продольная скорость этих потоков в основном лежит в пределах $V_{DO} \sim 100 - 250$ км/с.

Моделирование и теоретические оценки показывают существенную зависимость конфигурации ТС от параметров образующих его встречных потоков ионов. До недавнего времени для указанных выше потоков ионов кислорода их параметры не измерялись, и могли быть только приближенно оценены. Поэтому ранее для аналитической модели ТС рассматривалась область входных параметров модели, при которых получается относительно широкий ТС на ионах кислорода, в который вложен в разы или на порядок более тонкий протонный токовый слой. При этом в центре ТС плотность тока протонов была в разы больше плотности тока ионов кислорода.

В работе с помощью численной модели ТС показано, имеется вполне согласующаяся с последними данными измерений область входных параметров, для которых токовый слой на ионах кислорода по ширине сопоставим с протонным, и шире его примерно в 1.5 раза. При этом при одинаковых концентрациях ионов кислорода и протонов на краях ТС в его центре значения плотности тока и концентрации протонов в разы меньше, чем соответственно плотность тока и концентрация ионов кислорода.

ТОКОВЫЕ СЛОИ, МАГНИТНЫЕ ОСТРОВА И УСКОРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ ПО ДАННЫМ PARKER SOLAR PROBE

Хабарова О.В.[1, 2]

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

Parker Solar Probe стал первым космическим аппаратом, отправившимся по удлиненной орбите к Солнцу после сорокалетнего перерыва и несущим на борту аппаратуру для измерения параметров солнечного ветра. Богатый набор приборов позволил получить информацию о плазме с расстояний, максимально близких к короне Солнца, данные о которых ранее просто отсутствовали. В частности, разрешение приборов Parker Solar Probe позволило изучать тонкие плазменные структуры с толщиной порядка протонного гирорадиуса. Поскольку в научном сообществе мало наблюдателей, работавших с данными похожей миссии Helios, сразу возникло множество «открытий» новых структур, которые на поверку оказались давно известными разрывами, токовыми слоями и магнитными островами (они же плазмоиды и магнитные трубки в 3D). Один из нашумевших примеров - так называемые switchbacks и связанные с ними увеличения потока энергичных и тепловых частиц. Доклад представляет собой приведение к общему знаменателю публикаций по данным Parker Solar Probe, касающихся токовых слоев и магнитных островов, а также связанных с ними явлений, наблюдающихся на гелиоцентрических расстояниях менее 1 а.е. Обсуждаются примеры комбинации локального ускорения заряженных частиц магнитным пересоединением с ускорением в короне.

Работа поддержана грантом РНФ 20-42-04418.

ЗАМЫКАНИЕ ЛИНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ ГЕЛИОСФЕРНОГО ТОКОВОГО СЛОЯ

Кислов Р.А. [1], Малова Х.В. [1,2], Хабарова О.В. [3], Попов В.Ю. [1,4], Зелёный Л.М. [1]

[1] *ИКИ РАН, Москва, Россия*
[2] *НИИЯФ МГУ, Москва, Россия*
[3] *ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия*
[4] *ВШЭ, Москва, Россия*

Гелиосферный токовый слой (ГТС) преимущественно рассматривается как тангенциальный разрыв при построении МГД моделей. Данное представление в ряде случаев согласуется с наблюдениями и позволяет делать полезные с вычислительной точки зрения упрощения. Однако имеются данные, указывающие на распространённость ситуаций, когда в ГТС имеется ненулевая нормальная компонента магнитного поля на нейтральной линии. Иными словами, происходит замыкание линий магнитного поля в токовом слое. В этом случае при МГД моделировании формируется ненулевая нормальная компонента скорости плазмы, которая меняет знак при переходе через токовый слой. При непрерывности остальных компонент скорости образуется излом линий течения плазмы на нейтральной поверхности. Происходит накопление вещества в токовом слое и возникают условия для распада произвольного разрыва. В итоге токовый слой может разрушиться. В то же время наблюдения показывают, что ГТС является одной из самых стабильных структур в солнечном ветре. Поэтому возможны два сценария – либо токового слоя с замкнутыми линиями магнитного поля не существует, и построение соответствующих моделей лишено смысла, либо есть механизм, поддерживающий устойчивость такого слоя. Одним из таких механизмов может быть растекание плазмы по токовому слою. Ранее была создана модель токового слоя, основанная на квазиадиабатической динамике ионов, предполагающая формирование сильного тока в азимутальном направлении (Зелёный et al. 2016, Malova et al. 2017). Показано, что данный ток появляется из-за изменения направления движения ионов, которые размагничиваются при приближении к нейтральному слою. Далее они захватываются токовым слоем и движутся в его ближайшей окрестности по серпантинным орбитам перпендикулярно направлению втекания потока плазмы. В результате коллективного эффекта движения множества ионов, появляется дополнительная компонента скорости плазмы, направленная вдоль слоя, и приводящая к растеканию плазмы. Проведены вычисления тока в азимутальном направлении в условиях типичных для ГТС на 1 а.е. Показано, что эффект заворота потока плазмы вдоль слоя может решить проблему с избыточным накоплением вещества и развитием взрывной неустойчивости токового слоя с замкнутыми линиями магнитного поля. Теоретические оценки соответствуют наблюдениям.

Работа поддержана грантом РНФ 20-42-04418.

Зелёный Л. М., Малова Х. В., Григоренко Е. Е., Попов В. Ю. Тонкие токовые слои: от работ Гинзбурга-Сыроватского до наших дней // УФН – 2016. – Т. 186. № 11. с. 1153-1188. doi: 10.3367/UFNr.2016.09.037923

Malova H. V., Popov V. Yu., Grigorenko E. E., Petrukovich A. A., Delcourt D., Sharma A. S., Khabarova O. V., Zelenyi L. M. Evidence for quasi-adiabatic motion of charged particles in strong current sheets in the solar wind // The Astrophysical Journal. – 2017. – Vol. 834. Issue 1. – 34. http://dx.doi.org/10.3847/1538-4357/834/1/34

ЧЕМ ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ ЧИСЛО ТОКОВЫХ СЛОЕВ НА ОРБИТЕ ЗЕМЛИ?

Сагитов Т.М. [1,2], Обридко В.Н.[1], Хабарова О.В.[1], Кислов Р.А.[3, 1]

[1] *ИЗМИРАН, Москва, Троицк, Россия, sagitov@izmiran.ru*
[2] *ВШЭ, Москва, Россия*
[3] *ИКИ РАН, Москва, Россия*

Статистический анализ данных многолетней базы токовых слоев на 1 а.е. https://csdb.izmiran.ru показывает, что число токовых слоев в единицу времени варьируется в десятки и даже сотни раз. Токовые слои чаще регистрируются во время прихода турбулентных потоков, связанных с корональными выбросами масс (ICME sheath) и областями перемешивания разноскоростного солнечного ветра (corotating/stream interaction regions – CIRs/SIRs). Ранее было найдено, что число токовых слоев в сутки R определяется суммой плотностей кинетической и тепловой энергий солнечного ветра (Khabarova et al. 2021). При этом вклад члена, связанного с тепловой энергией, на порядок выше вклада члена, отвечающего за кинетическую энергию. На уровне простой статистики это проявляется в максимальной корреляции R с температурой солнечного ветра. Возник вопрос: Что первично – токовые слои активнее формируются в плазме с повышенной температурой или наоборот, токовые слои греют плазму, поэтому температура в их окрестности повышается? Теория допускает обе возможности. Более того, в последнее время появилось много работ, решающих известную проблему дополнительного нагрева солнечного ветра неизвестным источником путем привлечения выделения тепла на пересоединяющихся токовых слоях в турбулентной плазме. В связи с этим был проведен анализ гипотезы о том, что формирование токовых слоев преимущественно определяется свойствами солнечного ветра, а не наоборот. Температура солнечного ветра зависит от типа потоков, приходящих к Земле, и варьируется с 11-летним циклом солнечной активности, коррелируя с числами Вольфа со сдвигом около четверти цикла (максимум температуры приходится на фазу спада). Проанализированы характеристики солнечной активности, рассчитывающиеся а) по числу солнечных пятен и б) по уровню вклада дипольной, квадрупольной и других компонент в магнитное поле Солнца - так называемый индекс эффективного мультиполя (Obridko et al. 2021) .
Показано, что R плохо коррелирует с числом пятен, но следует за солнечной активностью, выражающейся в характеристиках крупномасштабного магнитного поля Солнца. Последнее больше связано с формированием долгоживущих корональных дыр и окружающих их потоков типа CIRs/SIRs, чем с активными областями и вспышками. Таким образом, (i) число токовых слоев преимущественно регулируется солнечными процессами, находящими свое отражение в солнечном ветре, и (ii) токовые слои вряд ли можно рассматривать как основную причину избыточного нагрева солнечного ветра.
Работа выполнена в рамках гранта РНФ 20-42-04418.

Khabarova, O., Sagitov, T., Kislov, R., & Li, G. Automated identification of current sheets—A new tool to study turbulence and intermittency in the solar wind. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 126, e2020JA029099. (2021). https://doi.org/10.1029/2020JA029099

Obridko, V.N., Sokoloff, D. D., Pipin, V.V., Shibalva, A. S., Livshits, I. M. Zonal harmonics of solar magnetic field for solar cycle forecast, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2021, 225, 105743, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105743

ТОКОВЫЕ СЛОИ ПЕРЕД ГЕОЭФФЕКТИВНЫМИ ПОТОКАМИ КАК ПРЕДВЕСТНИКИ МАГНИТНЫХ БУРЬ

Фридман М.Л.[1,2], Хабарова О.В.[1], Сагитов Т.М.[1,2], Кислов Р.А.[1,3]

[1] *ИЗМИРАН, г. Москва, Россия, lapinbank@gmail.com*
[2] *НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия*
[3] *ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

В работе показано, что изучение токовых слоев на орбите Земли может помочь прогнозировать магнитные бури. Число токовых слоев в солнечном ветре варьируется в зависимости от типа потока. Ранее было найдено (Khabarova et al. JGR, 2021), что максимум обнаружения токовых слоев приходится на турбулентные горячие потоки типа областей перемешивания corotating interaction regions (CIRs) и областей за ударной волной корональных выбросов масс (coronal mass ejection (ICME) sheath). Более того, увеличение числа токовых слоев нарастает за несколько часов до приближения потенциально геоэффективных потоков (CIR и ICME), что ассоциируется с пересечением так называемых магнитных полостей. С другой стороны, известно, что магнитные бури предваряются ULF-вариациями магнитного поля и плотности солнечного ветра. Показано, что такие ULF-вариации связаны с пересечением магнитных островов и токовых слоев, заполняющих магнитные полости перед CIR и ICME. Проведен статистический анализ частоты появления токовых слоев до магнитных бурь на базе данных токовых слоев на 1 а.е. https://csdb.izmiran.ru. Использовались данные за 2011-2013 гг., в течение которых случились 43 магнитных бури с индексом Dst ниже -50 нТ. Согласно полученным результатам наблюдается прирост на 80% числа токовых слоев от 40 минут до десятков часов до бури (в среднем, за 10 часов до бури), что говорит о потенциальной возможности использования токовых слоев как предвестников магнитных бурь. Разработан среднесрочный прогноз магнитных бурь с применением рекуррентных нейронных сетей, использующий данное явление. В качестве входных данных берутся минутные данные плотности солнечного ветра, оконного преобразования Фурье, а также данные по количеству токовых слоев. Приведены примеры среднесрочного прогноза магнитных бурь.

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ КИСЛОРОДА НА ФОРМИРОВАНИЕ ТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ ГЕОМАГНИТНОГО ХВОСТА

Домрин В.И.[1], Малова Х.В.[1,2], Попов В.Ю.[3,2], Григоренко Е.Е.[1]

[1]*НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, hmalova@yandex.ru*

[2]*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

[3]*ФИЗФАК МГУ, г. Москва, Россия*

Тонкие токовые слои с характерным поперечным масштабом от одного до нескольких протонных гирорадиусов наблюдаются во время магнитосферных возмущений - суббурь, когда сравнительно толстый токовый слой сжимается до некоторой предельной толщины, а затем спонтанно разрушается. Разрыв токового слоя сопровождается активными процессами, такими как ускорение и нагрев плазмы, генерацией сильных электрических полей и магнитогидродинамических волн. В настоящей работе развита и исследована модель сужающегося токового слоя, в котором, наряду с протонами, присутствуют также и тяжелые ионы кислорода. Целью моделирования являлось выявление закономерностей образования тонких токовых слоев в многокомпонентной плазме, иногда наблюдаемых в экспериментальных данных. Показано, что сходимость решения к равновесному в двухкомпонентной плазме может иметь особенности, а именно: при некоторых параметрах плазмы и магнитного поля происходит формирование многомасштабных токовых слоев, вложенных один в другой. В других диапазонах параметров может происходить образование одномасштабного токового слоя, в котором доминируют протоны, а тяжелые ионы движутся по хаотическим траекториям и вклада в ток не вносят. Аналогичным образом, может формироваться токовый слой с токонесущими тяжелыми ионами, при этом протоны вклада в ток могут не давать, а их траектории могут стать хаотическими. При некоторых параметрах кислородный токовый слой может иметь расщепленную форму с двумя максимумами, при этом вклад протонов в плотность тока может быть отрицательным.

Работа выполнена при поддержке Государственной программы «ПЛАЗМА».

ТОРМОЖЕНИЕ БЫСТРЫХ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ В ТОКОВОМ СЛОЕ, СФОРМИРОВАННОМ В ГЕЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ

Кирий Н.П.[1], **Франк А.Г.**[1], **Савинов С.А.**[2]

[1]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, г. Москва, Россия, kyrie@fpl.gpi.ru*
[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва, Россия*

В работе исследовались процессы ускорения и торможения плазмы в токовых слоях, развивающихся в гелиевой плазме в 2D магнитной конфигурации с нулевой линией. Особое внимание было уделено изучению механизма торможения ускоренных в токовом слое потоков плазмы.

Токовые слои создавались с помощью установки ТС-3D в магнитном поле с нулевой линией X типа и градиентом 0.5 кГс/см; начальное давление гелия составляло ~320 мТорр, амплитуда тока в слое 45 кА, полупериод тока T/2 = 6 мкс [1].

Параметры плазмы определялись на основе анализа профилей спектральных линий ионов гелия: He II 468.6 нм (переход n = 3 → n = 2) и He II 320.3 нм (переход n = 4 → n = 2). Профили линий гелия регистрировались с помощью электронно-оптической камеры “Nanogate 1-UF”, в которой использовалась микроканальная пластина в качестве усилителя яркости и ПЗС матрица. Измерения проводились одновременно в двух направлениях: вдоль электрического тока, протекающего в плазме, и вдоль большего поперечного размера (ширины) слоя. Это позволило выделить направленные скорости ионов гелия на фоне тепловых скоростей. В гелиевой плазме линии He II уширяются за счет эффектов Доплера и Штарка в микрополях плазмы. Различие в константах доплеровского и штарковского уширений линий He II позволило определить энергию теплового и направленного движения ионов, а также плотность электронов в различных областях токового слоя [2,3]. Структура магнитных полей, электрических токов и сил Ампера в токовых слоях была получена с помощью измерений магнитными зондами [4].

Установлено, что под действием сил Ампера плазма ускоряется от центра токового слоя к его боковым краям. Энергия ускоренных ионов гелия при этом быстро увеличивается до ~ 400 эВ при температуре ионов ~ 50 эВ. Практически сразу после достижения своего максимального значения энергия ускоренных ионов быстро уменьшается [2,3].

Обнаружено, что в токовом слое, сформированном в гелиевой плазме, возбуждаются токи обратного направления по отношению к основному току, протекающему в слое, что обусловлено движением ускоренных потоков плазмы в магнитном поле [5].

Обратные токи локализованы, главным образом, на боковых краях слоя, где появляются силы Ампера, направленные против сил, действующих в центральной области слоя и вызывающих ускорение плазмы. Силы Ампера, возникающие на краях токового слоя, изменяют характер движения плазмы, приводя к торможению первоначально ускоренных потоков ионов гелия [6].

[1]. Франк А.Г. // УФН. 2010. Т. 180. С. 982.
[2]. Кирий Н.П., Марков В.С., Франк А.Г. // Письма в ЖЭТФ. 2012. Т. 95. С. 14.
[3]. Кирий Н.П., Франк А.Г. // Физика плазмы. 2012. Т. 38. С. 1042.
[4]. Франк А.Г., Сатунин С.Н. // Физика плазмы. 2011. Т. 37. С. 889.
[5]. Франк А.Г., Сатунин С.Н. // Письма в ЖЭТФ. 2020. Т. 112. С. 667.
[6]. A.G. Frank, N.P. Kyrie, S.N. Satunin, S.A. Savinov // Universe. 2021. 7. 400.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА МАГНИТОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

Цыганов М.В., Захаров В.И., Сухарева Н.А.

МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, cyganov.mv15@physics.msu.ru

Динамика движения потоков заряженных частиц межпланетной плазмы характеризуется нелокальностью процессов взаимодействия с электромагнитными полями и сопутствующими потоками частиц, длительным последействием, что отражается на стохастических и статистических свойствах регистрируемых временных рядов.

При анализе временных рядов отдельной проблемой является анализ многомерных структур, содержащих скрытую информацию в разных временных масштабах. В работе предложена и апробирована методика анализа многомасштабных метастабильных процессов, в которых изменение основных параметров модели происходит гораздо медленнее, нежели изменение регистрируемых значений. Разработанный подход основан на свойствах наследования топологических признаков в динамическом отклике при наличии «долговременной памяти у системы». Обработке подвергаются «неразрывные» последовательности значений без дополнительного заполнения интервалов.

Топологический анализ данных — активно развивающаяся область исследований на границе слияния алгебраической топологии, статистики, теории вычислений, имеющая мощный и уникальный набор методов для извлечения качественной и количественной информации из базовой структуры данных [1-3]. Один из сильных инструментов топологического анализа, – метод исследования персистентной гомологии, особенно в сочетании со статистическими линейными и нелинейными методами. Основные используемые методики – синтез многомерных вложений с временной задержкой и подход скользящего окна. Эти методики позволяют преобразовывать временные ряды в последовательности облаков точек, что необходимо для применения разрабатываемых инструментов.

В качестве источника референтных данных для отладки и тестирования создаваемых процедур обработки использована база https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/om_filt_min.html (2014 год), в которой представлены ежеминутные выборки скалярных и векторных характеристик структуры магнитного поля и потоков протонов, пересчитанные геомагнитные индексы. Обсуждаются решения проблемы поиска наиболее адекватной модели на основе принципа максимальной q-деформированной энтропии, что помогает уменьшить количество лежащих в основе методики вероятностных предположений. Обсуждается связь между оптимальными параметризациями прямой и обратной задач, что позволяет применять развиваемый метод не только к задачам мониторинга, но и задачам прогнозирования. Проводится сравнение сложности алгоритмов со смешанными моделями Гаусса, скрытыми марковскими моделями, методами локального ядра.

Работа выполнена в рамках Государственного задания АААА-А17-117121890022-8, а также в процессе работ по программе развития НОШ МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

1. Umeda Y., Kaneko J., Kikuchi H. Topological data analysis and its application to time-series data analysis //Fujitsu Scientific & Technical Journal. – 2019. – Т. 55. – №. 2. – С. 65-71.
2. Karan A., Kaygun A. Time series classification via topological data analysis //Expert Systems with Applications. – 2021. – С. 115326.
3. Gao Y. et al. Exploring spatio-temporal correlation and complexity of safety monitoring data by complex networks //Automation in Construction. – 2022. – Т. 135. – С. 104115.

ИНВАРИАНТЫ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА МАГНИТОСФЕРЫ И ИОНОСФЕРЫ

Сухарева Н.А., Захаров В.И., Цыганов М.В.

МГУ имени М.В.Ломоносова, г. Москва, Россия, suhareva@physics.msu.ru

На основе многомерных временных рядов физических характеристик геомагнитной активности, таких как 3D-компоненты магнитного поля, плотность и компоненты вектора скорости потоков электронов и протонов, локальной температуры представлен новый аппарат контроля состояния указанных сред. Анализ выполнен на основе открытых данных https://omniweb.gsfc.nasa.gov/ и http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/. Развиваемый метод основан на последовательности оценок собственных нелинейно-динамических свойств совокупности временных рядов, основные из которых дают возможность: определения размерности фазового пространства исследуемого процесса, установления динамического диапазона вариации размерности,

- реконструкции кинетики вариации размерности пространства вложения для однопараметрических временных рядов,
- оценке собственных масштабов времени и их корреляция с дисперсией локальных распределений фрагмента временного ряда,
- определения показателя Ляпунова по Розенштейну,
- расчета спектра показателей Ляпунова по Экманну,
- типы ожидаемых аттракторов,
- оценка времени возврата Пуанкаре.

Физически указанный подход означает попытку определения ведущих физических характеристик, определяющих основные тренды динамики (как причины, так и структуру отклика) для всей совокупности регистрируемых экспериментальных данных. Изменение размерности должно быть связано с интенсивной перестройкой системы, предлагаемый теоретический подход описывает такое изменение как перестройку типа аттрактора. Таким образом, возможна реконструкция кинетики вариации размерности пространства вложения в согласовании с собственными масштабами времени многокмерного процесса. При определении размерности было получено практически совпадающее для всех типов временных рядов значение, равное пяти . После определения размерности пространства вложения, спектра собственных временных лагов, определяются времена релаксации или показатели экспонент Ляпунова. [1] Фактически становится возможной реконструкция проекций динамического фазового портрета и матрицы переходов в системе ионосфера-магнитосфера, данные о которых содержатся в наблюдаемых рядах [2]. Все сказанное позволяет утверждать, что предложена и опробована новая методика анализа магнитосферно-ионосферных взаимодействий как результата развития стохастического нелинейного динамического процесса. Предлагаемый анализ позволяет определять оптимальное количество независимых физических параметров, реализующих текущее наблюдаемое состояние системы и может использоваться для построения адаптивных вариантов модели ионосферы [3, 4].

Работа выполнена в рамках Государственного задания АААА-А17-117121890022-8, а также по программе развития НОШ МГУ «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».

1. Chan A., De Luca A., Chalker J. T. Spectral Lyapunov exponents in chaotic and localized many-body quantum systems //Physical Review Research. – 2021. – Т. 3. – №. 2. – С. 023118.
2. Krämer K. H. et al. A unified and automated approach to attractor reconstruction //New Journal of Physics. – 2021. – Т. 23. – №. 3. – С. 033017.
3. Banerjee A. et al. A SOC based avalanche model to study the magnetosphere-ionosphere energy transfer and AE index fluctuations //NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics. – 2021. – С. 1-15.
4. Fok M. C. et al. New Developments in the Comprehensive Inner Magnetosphere-Ionosphere Model //Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2021. – Т. 126. – №. 4. – С. e2020JA028987.

МЕЛКОМАСШТАБНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В КАСКАДНОЙ МОДЕЛИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Абушзаде И.З., Юшков Е.В., Соколов Д.Д.

Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Баку, Азербайджан, ilyasabushzade@gmail.com

Каскадные модели мгд-турбулентности упрощённо описывают взаимодействие турбулентных вихрей разных масштабов между собой [1]. Полученные преобразованием Фурье из уравнения движения плазмы и магнитного уравнения индукции на конечном числе спектральных оболочек, они позволяют проанализировать каскад гидродинамической и магнитной энергии по спектру, накопление энергии и ее диссипацию со временем. При этом при малом магнитном поле может наблюдаться перекачка энергии движения плазмы в энергию поля, таким образом, что сама магнитная энергия растет экспоненциально и при этом локализуется на малых масштабах. Это наводит на мысль, что подобная генерация может являться отображением хорошо известного мелкомасштабного динамо-процесса Казанцева, который описывает рост магнитной энергии в петлях с характерным масштабом соответствующим корреляционной длине поля скорости [2]. В настоящей работе, мы проверяем этот факт, запуская модель Казанцева с корреляционными функциями потока, полученными из гидродинамического спектра каскадной модели. Сравнивая скорости роста и области локализации обеих моделей, удается оценить, какая часть спектра отвечает за мелкомасштабное динамо и что в этом случае происходит с корреляционными временами поля скорости, играющими ключевую роль в подходе Казанцева.

1. Фрик П. Г. Турбулентность: подходы и модели. — Изд. 2-е, испр. и доп. — М.–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2010. — 332 с.

2. Kazantsev A.P., SOVIET PHYSICS JETP Zh. Eksp. Tear. Fiz. 53, 1806-1813 (November, 1967)

НАБЛЮДЕНИЯ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ОТ МГД ДО СУБИОННОГО МАСШТАБА НА РАССТОЯНИИ 0,17 А.Е. ПО ДАННЫМ PARKER SOLAR PROBE

Виноградов А.А.[1,2], **Александрова О.Б.**[2], **Артемьев А.В.**[1,3], **Maksimovic M.**[2], **Васильев А.А.**[1] **Петрукович А.А.**[1], **Mangeney A.**[2], **Karine Issautier**[2] , **Michel Moncuquet**[2]

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

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

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

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

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

Измерение магнитного поля солнечного ветра Parker Solar Probe во время первого перигелия позволяет разрешить флуктуации от МГД до суб-ионных масштабов. В данной работе мы исследуем каскад турбулентных флуктуаций и образовавшиеся в турбулентности структуры. Используя скалограмму магнитных флуктуаций, можно видеть, что когерентные структуры покрывают широкий диапазон масштабов. Коэффициент заполнения когерентных структур составляет несколько процентов. Мы анализируем магнитные колебания в различных диапазонах частот. Мы наблюдаем сосуществование событий на МГД, ионных и субионных масштабах в виде токовых слоев и вихрей. Подход выбора структур только по полной энергии флуктуаций не является полным, так как он может пропустить структуры с изменением модуля магнитного поля. Для полноты мы проводим аналогичный анализ для продольных магнитных флуктуаций.

КРИТЕРИЙ БЕСКОНЕЧНОЙ ГАММА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В МОДЕЛИ ДВАЕРА

Седельников А .С., Землянская Д.И., Стадничук Е.М.

ФИАН, г. Москва, Россия, sedelnikov.as@phystech.edu

Одной из важнейших задач в атмосферной физике высоких энергий является построение модели гамма вспышек земного происхождения (Terrestrial Gamma-ray Frlashes, TGF). Установлено, что лавины убегающих электронов, ускоряемые электрическим полем в грозовых облаках, являются источниками этих вспышек [1]. Однако, электронов, образующихся в лавинном процессе, оказывается недостаточно для описания TGF, экспериментально наблюдаемых из космоса. Джозефом Дваером была предложена модель обратной связи, увеличивающая число частиц в лавинах [2]. Одним из ключевых механизмов в модели Дваера является гамма обратная связь, вклад которой увеличивается с ростом напряжённости электрического поля [3]. В основе гамма обратной связи лежит явление разворота фотонов тормозного излучения, образующегося при ускорении электронов в поле облака. Эти фотоны могут рождать новые электроны в начале области образования лавины, что приводит к образованию вторичных лавин.

В данной работе был выведен критерий образования бесконечной обратной связи за счёт разворота тормозных гамма квантов. Рассмотрим ячейку длины L с постоянным и однородным электрическим полем. Пусть λ_{RREA} - длина экспоненциального нарастания лавины; λ_γ - длина пробега убегающего электрона до рождения гаммы; $\lambda_{\gamma\to e}$ - длина пробега гаммы до рождения убегающего электрона; λ_x - длина ослабления пучка гамма квантов; P_γ - вероятность разворота гаммы; p_e - вероятность разворота электрона. Эти параметры зависят от электрического поля и плотности воздуха. Тогда полученный критерий обратной связи выражается неравенством:

$$\frac{p_e p_\gamma}{\lambda_{\gamma\to e}\lambda_\gamma}\left(\frac{\lambda_{RREA}\lambda_x}{\lambda_x-\lambda_{RREA}}\right)^2\left(e^{\frac{L(\lambda_x-\lambda_{RREA})}{\lambda_x\lambda_{RREA}}}-1-\frac{L\left(\lambda_x-\lambda_{RREA}\right)}{\lambda_x\lambda_{RREA}}\right)>1$$

Полученное соотношение может быть использовано при дальнейшем изучении вклада бесконечной гамма обратной связи в динамику электронных лавин.

1. Dwyer J.R. [et al.] A study of X-ray emission from laboratory sparks in air at atmospheric pressure //Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2008. – Т. 113. – №. D23.

2. Dwyer J.R. A fundamental limit on electric fields in air //Geophysical Research Letters. – 2003. – Т. 30. – №. 20.

3. Бабич Л.П. Лавина релятивистских убегающих электронов //Успехи физических наук. – 2020. – Т. 190. – №. 12. – С. 1261-1292.

НАСЫЩАЮЩЕЕ МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВЕЙБЕЛЕВСКОЙ ТМ-НЕУСТОЙЧИВОСТИ И ДИНАМИКА ЕЁ ПРОСТРАНСТВЕННОГО СПЕКТРА ДЛЯ АНИЗОТРОПНЫХ МАКСВЕЛЛОВСКИХ И КАППА-РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ЧАСТИЦ В ОДНО- И ДВУМЕРНЫХ МОДЕЛЯХ

Кузнецов А.А.[1], **Гарасёв М.А.**[1], **Нечаев А.А.**[1], **Кочаровский В.В.**[1, 2], **Кочаровский Вл.В.**[1]

1 ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, kochar@appl.sci-nnov.ru
2 Dept. of Physics and Astronomy, Texas A&M Univ., College Station, USA

Для широкого класса задач физики неравновесной космической и лабораторной плазмы важна проблема насыщения и нелинейной эволюции пространственного спектра вейбелевской неустойчивости, обусловленной анизотропией распределения частиц по скоростям и формирующей квазимагнитостатическую турбулентность в ходе тех или иных переходных процессов. Сложные анизотропные распределения частиц, например, каппа и другие немаксвелловские, наблюдаются и/или ожидаются для лазерной плазмы, солнечного ветра, активных областей корон звёзд, бесстолкновительных ударных волн.

Настоящий доклад основан на оригинальной (квазилинейной) программе одно- и двумерного моделирования нелинейного развития пространственных гармоник вейбелевской ТМ-неустойчивости и посвящён выявлению качественных закономерностей согласованной динамики квазимагнитостатической турбулентности и различных (бимаксвелловских и бикаппа) распределений частиц в неравновесной бесстолкновительной однородной плазме. Соответствующая система уравнений Максвелла-Власова решалась численным методом Leapfrog для многих сотен гармоник с волновыми векторами, лежащими в плоскости расчёта, которая включала ось анизотропии с максимальной эффективной температурой частиц.

В широкой области как малых, так и больших значений степени начальной анизотропии распределения частиц найдено насыщающее значение магнитного поля, прослежено его дальнейшее медленное нелинейное спадание, установлен характер эволюции основной части энергонесущих гармоник турбулентности, определён закон изменения ширины их спектра вдоль и поперёк оси анизотропии, выявлены типичные закономерности деформации (выполаживания) функции распределения частиц по скоростям, получены характерные зависимости изменения эффективных температур и степени анизотропии этих распределений от времени на нелинейной стадии развития неустойчивости.

Проведён сравнительный анализ полученных результатов для 1- и 2-мерных задач, для бимаксвелловских и бикаппа-распределений частиц, для малых и больших (по сравнению с единицей) начальных значений их степени анизотропии. Особое внимание уделено проявлению нелинейных и/или квазилинейных эффектов взаимодействия различных гармоник между собой и с теми или иными фракциями функции распределения частиц.

Дано также сравнение с известными результатами анализа нелинейной эволюции вейбелевской неустойчивости в тех областях параметров, где доступные аналитические, например квазилинейные, и численные, например PIC (частицы в ячейках), методы конкурентоспособны с использованным нами методом. Наконец, сделаны оригинальные аналитические оценки уровня насыщения и характера эволюции вейбелевской турбулентности на основе развитой ранее одномерной квазилинейной теории, которые оказались в согласии с результатами численного моделирования в области её применимости.

Численное моделирование и качественный анализ полученных результатов выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 21-12-00416).

Моделирование мультифрактального турбулентного электромагнитного поля

Н.Н. Левашов[1,*], В.Ю. Попов[1,2,3], Х.В. Малова[2,4], Л.М. Зеленый[2]
[1]Физический факультет МГУ им М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия panterny@yandex.ru
[2]Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия
[3]Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», г.Москва, Россия
[4]Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

Турбулентное электромагнитное поле в хвосте магнитосферы Земли, является нестационарным и склонно к появлению структур таких как токовые слои, вихри, жгуты, плазмоиды. Моделировать электромагнитное поле с подобными локальными особенностями можно при помощи суперпозиции вейвлетов. В качестве базового вейвлета выберем Гауссов вейвлет:

$Q(x,y)_{i,j} = h_{i,j} \cdot q_i \cdot exp\left(-\frac{\pi}{2a_{i,j}}\left[\left(x - x_{i,j}(t)\right)^2 + \left(y - y_{i,j}(t)\right)^2\right]\right)$, где $x_{i,j}(t)$ и $y_{i,j}(t)$ – координаты соответствующего вейвлета, q_i - коэффициенты нормировки для вейвлетов *i*-го масштаба, $h_{i,j}$ - случайный коэффициент для каждого вейвлета.

Итоговое магнитное поле представляется в виде суммы вейвлетов, равномерно распределенных по вычислительной области: $Q(x,y) = \sum_{i,j} Q(x,y)_{i,j}$. Электрическое поле можно рассчитать при помощи уравнений Максвелла.

Для того, чтобы полученное таким образом поле было самоподобным, соотношение между размерами соседних классов вейвлетов должно быть независимым от *i*: $\frac{a_{i+1}}{a_i} = l$. Объём пространства, *V* занимаемый каждым классом вейвлетов, имеет степенную зависимость от *l*: $\frac{V_{i+1}}{V_i} = l^{\beta}$. В силу самоподобия, соотношение $\frac{q_{i+1}}{q_i} = l^{\lambda}$ так же не зависит от i.

Спектр энергии полученного поля: $W(k) \sim k^{-D-\beta-2\lambda}$, где D - размерность пространства, в котором мы моделируем наше поле.

Положим что $\beta = 0$, $\lambda = 1/3$, $l = 1/2$ а $D = 2$. Предположим, что нормировочные коэффициенты определенного класса вейвлетов распределены не равномерно по всему пространству: пусть вычислительная область разбита на квадратные ячейки, в каждой из которых свой нормировочный множитель у вейвлет-коэффициентов. Например, для самого крупного класса вейвлетов область будет разбита на 4 ячейки с нормировочными множителями $q_0 p_1$, $q_0 p_2$, $q_0 p_3$, $q_0 p_4$ соответственно, где $p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1$. Для класса вейвлетов, с масштабом вдвое меньше - разобьем каждую клеточку более крупного класса еще на 4 части, для класса вейвлетов с еще вдвое меньшим масштабом - снова разбиваем каждую клеточку на 4 части итд.

При таком разбиении, функция мультифрактального спектра, $f(h)$, где h - показатель Гёльдера, будет выпуклая, и вблизи своего максимума может быть аппроксимирована параболой [1]. Все сигналы лабораторной и космической плазмы имеют подобный уширенный мультифрактальный спектр [2]. Максимум спектра будет приходиться на $h = 1/3$, а ширина спектра зависит от выбора параметров p_1, p_2, p_3, p_4. Показатели структурной функции $\zeta_p = \inf[ph - f(h)]$ [3], таким образом, варьируя параметры p_1, p_2, p_3, p_4, мы можем контролировать степень отклонения ζ_p от прямой, т.е. контролировать уровень перемежаемости.

1. Божокин С.В., Паршин Д.А., Фракталы и мультифракталы. Ижевск, 2001.
2. В. П. Будаев, С. П. Савин, Л. М. Зелёный // УФН, 2011, Т. 181, № 9, С. 905–952
3. Frisch U. Turbulence: The Legacy of A.N. Kolmogorov.U.K.: Cambridge Press, 1995.

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В СЕТИ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ МОЛНИИ

Иудин Д.И.

ПИМУ, г. Нижний Новгород, Россия, iudin@ipfran.ru

Молния — это саморазвивающаяся транспортная система плазменных каналов, демонстрирующая способность к саморегуляции за счет самосогласованного поддержания нулевого суммарного заряда своей разветвленной структуры. Электрическая нейтральность молнии предполагает наличие двух примерно равных электрических конденсаторов, соответствующих положительной и отрицательной частям дерева молнии. Развитие молнии происходит прерывисто и сопровождается значительными морфологическими изменениями: появляются новые структурные элементы; некоторые старые исчезают. Как молнии удается уравновешивать эти прерывистые морфологические изменения в своих полярных регионах, чтобы сохранить свою электрическую нейтральность? В представленной работе показано, что гомеостаз развития молнии осуществляется через переходные события, включающие рождение, распад и реактивацию плазменных ветвей дерева электрического разряда. В рамках проведённого исследования показано, что способность молнии как открытой системы сохранять постоянство своего внутреннего состояния тесно связана с асимметрией полярности: морфологические и транспортные свойства молнии обусловлены нарушением структурной симметрии дерева электрического разряда при смене направления тока на противоположное. Движение точки реверса молнии (точки нулевого заряда чехла двунаправленного лидера) от места зарождения в направлении развития доминирующего лидера является принципиальным проявлением асимметрии полярности молнии. В данном исследовании на основе парадигмы движущейся точки реверса предложена классификация основных типов переходных процессов, связанных с реактивацией распавшихся ветвей доминантного лидера. Исследовано, при каких условиях отрицательный лидер становится доминирующим вместо положительного, сохраняющего свое доминирование в подавляющем большинстве ситуаций. Показано, что транзиенты, вызванные реактивацией распавшихся ветвей доминантного отрицательного лидера, являются просто полярными антиподами транзиентов, связанных с доминированием положительного лидера. Переходные процессы сопровождаются процессами перезарядки чехла лидера, которые обеспечивают движение точки реверса в сторону доминирующего лидера. Установлено, что точка реверса может двигаться быстрее, чем доминирующий лидер, если подчиненный лидер затухает.

1. Iudin D.I. Lightning as an asymmetric branching network // Atmos. Res. 2021. Vol. 256, P. 105560, doi:10.1016/j.atmosres.2021.105560.

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ СМЫСЛ НАКЛОНА КОЛМОГОРОВСКОГО СПЕКТРА МАГНИТНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Ахметьев П.М.

ИЗМИРАН, г. Москва, Троицк, Россия, pmakhmet@mail.ru

Многие небесные тела допускают магнитные поля, которые, согласно современным представлениям, генерируются движениями проводящей жидкости. Процесс динамо трансформирует кинетическую энергию жидкой среды в магнитную энергию. Пространственный масштаб сгенерированного среднего магнитного поля называется крупным. Для изучения крупномасштабных средних магнитных полей применяются спектры Фурье [1]. Здесь же разъясняется роль инвариантов магнитных линий при изучения процесса динамо.

Хорошо известно, что основным инвариантом магнитных линий служит магнитная спиральность. Это инвариант в идеальной магнитной гидродинамике, который допускает калибровочно-инвариантную плотность. Наиболее естественное и прозрачное представление о магнитной спиральности основано на теореме Арнольда об асимптотическом эргодическом инварианте Хопфа [2]. В [3] показано, как теорема Арнольда о функции плотности инварианта магнитной спиральности может, в принципе, применяться для изучения крупномасштабных магнитных полей. Тем не менее, наиболее важный для приложений колмогоровский спектр магнитной турбулентности, при помощи лишь одного интварианта магнитной спиральности объяснить не удается.

С другой стороны, известно, что магнитная спиральность не является единственным инвариантом магнитных линий, который допускает калибровочно-инвариантную плотность. В [5] определена разновидность М-инварианта, которая использует пятерки магнитных линий. Мы изучаем вопрос: возможно ли объяснить показатель −1.7 наклона колмогоровского спектра магнитной энергии исходя из представления о фрактальности М-инварианта магнитных линий? Получен утвердительный ответ в предположении, что квазипериодическое магнитное поле свободно распределено по спектру Фурье.

В докладе мы остановимся на геометрической стороне вопроса. Будет объяснено на примерах как определяется М-инвариант для пятерок замкнутых магнитных линий и почему для его строгого определения требуется ряд Конвея-Мелихова от двух переменных [5].

1. Ya. B. Zeldovich, A. A. Ruzmaikin, and D. D. Sokoloff, Magnetic Fields in Astrophysics, Gordon and Breach, New York (1983).
3. V. I. Arnold and B. A. Khesin, Topological Methods in Hydrodynamics, Applied Mathematical Sciences, Vol. 125, (2012).
3. P. M. Akhmet'ev, "Magnetic helicity flux for mean magnetic field equations," Theoretical and Mathematical Physics, 204, 947–956 (2020).
4. P. M. Akhmet'ev, "Topological meaning of the slope of the kolmogorov spectrum of magnetic turbulence", Theoretical and Mathematical Physics, 209(2): 1507–1520 (2021).
5. П.М.Ахметьев, "О младших коэффициентах ряда Конвея–Мелихова от двух переменных" *Семинар по геометрической топологии 17 декабря 2021 г. 17:00–19:00*, г. Москва http://www.mathnet.ru/php/seminars.phtml?option_lang=rus&presentid=33603

АКР И ФРАКТАЛЬНОСТЬ

Чернышов А.А.[1], **Чугунин Д.В.**[1], **Могилевский М.М.**[1]

[1]*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия, achernyshov@iki.rssi.ru*

В данном исследовании авроральное километровое радиоизлучение (АКР) используется как средство дистанционной диагностики процессов в магнитосфере Земли. Используя спутниковые данные о спектре флуктуаций АКР на различных частотах, мы определяем фрактальные свойства авроральной области магнитосферы в зависимости от высоты источника и частоты генерации излучения. По скейлингу определены фрактальные характеристики (показатель Херста и фрактальная размерность) среды в области генерации АКР и их изменения в зависимости от высоты и частоты. Показано, что с увеличением высоты (или, что тоже самое, с уменьшением частоты сигнала) увеличивается значение скейлинга и показателя Херста, в то время как фрактальная размерность уменьшается с высотой. Рассмотрены случаи регистрации АКР при различных геомагнитных условиях, когда интенсивность АКР отличалась на порядок, однако при этом наблюдается устойчивый тренд на уменьшение фрактальной размерности с высотой. Полученные значения скейлинга и фрактальных параметров указывают на то, что рассматриваемые процессы обнаруживают свойства характерные для дальних взаимодействий. .

ЭСТАФЕТНЫЙ ПЕРЕНОС ЗАРЯДА В ГРОЗОВОМ ОБЛАКЕ И ЕГО РОЛЬ В ПРОЦЕССЕ ИНИЦИАЦИИ МОЛНИИ

Сысоев А.А.[1, 2], **Иудин Д.И.** [1, 2]

[1]*ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия, zaratustrann@yandex.ru*
[2]*Приволжский исследовательский медицинский университет, г. Нижний Новгород, Россия*

В работе предложен и численно исследован новый механизм переноса заряда в грозовом облаке, который может быть назван «эстафетным». Он опирается на динамику системы, состоящей из относительно небольшого числа постоянно возникающих и затухающих проводящих плазменных образований. В рамках трехмерной простой кубической решетки крупномасштабное разделение точечных зарядов обеспечивается стохастической динамикой системы проводящих кластеров. Несмотря на то, что данные кластеры не контактируют на мгновенных снимках 3D системы, они оказываются связанными в 4D пространственно-временном континууме за счет меняющейся во времени геометрии. Иными словами, пространственные заряды, некогда разделенные уже затухшими проводящими структурами, «подхватываются» и переносятся вновь возникающими кластерами.

Рассматриваемый механизм проявляется в двух последовательных модах, соответствующих дострimерной и стримерной/лидерной стадиям эволюции грозового облака, каждая из которых была изучена в рамках отдельной численной модели. На начальном, гораздо более долгом и пространственно-однородном, этапе эстафетный перенос заряда опирается на постоянно возникающие и затухающие области повышенной ионной проводимости, недавно исследованные в работе [1]. Они представляют собой проводящие плазменные образования с характерными размерами, временами жизни и проводимостями порядка 0.1-1 м, 1-10 с и 10^{-10}-10^{-9} См/м соответственно. Их динамика создает флуктуации электрического поля с постоянно нарастающими амплитудами, что в конце концов приводит к инициации положительных стримеров. На последующей стримерной/лидерной стадии эффективность эстафетного переноса заряда резко возрастает за счет того, что разрядные структуры способны расти и сливаться друг с другом. Ускоряющееся во времени слияние самоорганизующихся разрядных систем в конце концов оканчивается формированием перколяционного кластера, перекрывающего внутриоблачную зону сильного электрического поля. Тот факт, что результирующий фрактальный хорошо проводящий кластер может быть ассоциирован с самоподдерживающимся зародышем молнии, подчеркивает роль эстафетного переноса заряда в процессе инициации молниевого разряда.

Результаты моделирования были использованы для нахождения аналитической формы зависимости эффективной проводимости среды от концентрации проводящих элементов. Было установлено, что эстафетная проводимость является резко растущей функцией относительной доли пространства, занятого проводящими плазменными образованиями. При этом эффективность эстафетного переноса заряда значительно возрастает, если места появления и пространственные ориентации возникающих связей определяются локальным электрическим полем, поскольку в этом случае система является самоорганизующейся.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 19-17-00183.

1. Iudin D.I., Rakov V.A., Syssoev A.A., Bulatov A.A., Hayakawa M. // NPJ Clim. Atmos. Sci. 2019. V. **2,** No. 46.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТРИЦЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ДИНАМИКИ ЛАВИН РЕЛЯТИВИСТСКИХ УБЕГАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

Стадничук Е.М.

МФТИ (НИУ), НИУ ВШЭ, г. Москва, Россия, yegor.stadnichuk@phystech.edu

В сильных и протяжённых электрических полях внутри грозовых облаков релятивистские электроны способны получать больше энергии от электрического поля чем они в среднем теряют на взаимодействие с окружающим их воздухом. Такие электроны называются убегающими [1]. Их распространение сквозь грозовую среду приводит к их размножению за счёт выбивания дополнительных электронов из молекул воздуха. Таким образом, образуются Лавины Релятивистских Убегающих Электронов (ЛРУЭ) [2]. ЛРУЭ играют существенную роль в физике атмосферного электрическтва, поскольку их существование может приводить к Terrestrial Gamma-ray Flashes [3] и Thunderstorm Ground Enhancement [4]. Кроме того, ионизация, создаваемая ЛРУЭ, может играть ключевую роль в инициации молнии [5].

В однородном электрическом поле ЛРУЭ могут быть значительно усилены за счёт релятивистской обратной связи [6]. Релятивистская обратная связь обеспечивает размножение лавин, увеличивая интенсивность грозовых релятивистских частиц. Однако для эффективной работы релятивистской обратной связи требуются очень большие и протяжённые напряжённости электрического поля.

Грозовое электрическое поле может иметь сложную неоднородную электрическую структуру [5,9]. В сложных грозовых электрических структурах появляется реакторная обратная связь, которая обеспечивает размножение ЛРУЭ за счёт обмена гамма-излучением между отдельными ускоряющими ЛРУЭ областями сложного грозового поля [7]. Такие области называются ячейками. Реакторная обратная связь обеспечивает эффективное размножение ЛРУЭ в более низких электрических полях по сравнению с релятивистской обратной связью за счёт сложности структуры электрического поля [7,8].

Динамика ЛРУЭ в сложных электрических структурах может быть описана с помощью матрицы обратной связи. Элементами этой матрицы являются операторы обратной связи, которые, действуя на пространственное распределение точек старта ЛРУЭ в одной из ячеек дают пространственное распределение ЛРУЭ в другой ячейке в следующем поколении обратной связи. Матричные элементы учитывают в себе как физику транспорта гамма-излучения между ячейками, так и физику развития лавин убегающих электронов. Диагональные элементы матрицы описывают действие ячеек самих на себя за счёт релятивистской обратной связи, недиагональные элементы описывают взаимодействие различных ячеек за счёт обмена гамма-излучением. С помощью матрицы обратной связи задача о динамике ЛРУЭ в сложных элктрических структурах сводится к задаче о поиске собственных векторов и собственных значений матрицы.

В настоящей работе с помощью матрицы обратной связи были получены аналитические описания динамике ЛРУЭ в различных структурах электрического поля. Изучена динамика ЛРУЭ в грозовых облаках с большим количеством вертикально чередующихся зарядовых слоёв. Также получено решение и для более сложных геометрий поля. Для всех рассмотренных случаев выведен критерий возникновения бесконечной обратной связи, при которой возможна генерация Terrestrial Gamma-ray Flashes.

Работа была поддержана грантом Фонда развития теоретической физики и математики «БАЗИС».

ЭФФЕКТЫ ЛОКАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИИ В МОДЕЛИ КАЗАНЦЕВА

Аллахвердиев Р.Р., Юшков Е.В., Соколов Д.Д.

Филиал МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Баку, Азербайджан, ramin.a.verdi@gmail.com

Модель Казанцева описывает эволюцию второго момента магнитного поля в турбулентном плазменном потоке [1]. В частности, эта модель используется для описания мелкомасштабного динамо-процесса, при котором экспоненциально растет энергия магнитного поля, в то время как среднее магнитное поле остается нулевым. Традиционно такая генерация рассматривается в локально анизотропной однородной турбулентности, однако, используя метод мультипликативных интегралов, можно расширить применение этой модели и на анизотропный неоднородный случай. Используемый мультипликативный подход, предложенный Молчановым, Рузмайкиным и Соколовым, базируется на двух предположения: во-первых, рассматривается поле скорости с короткими временными корреляциями, что позволяет развязать усреднение по магнитному полю и полю скорости, во-вторых, траектории жидких частиц заменяются на пучки виннеровских траекторий, усреднение по которым позволяет учесть диссипативные эффекты [2]. Записывая решение уравнения магнитной индукции в виде мультипликативных интегралов и вычисляя производные по времени от корреляционных функций магнитного поля, мы выводим анизотропную модель Казанцева и аналитически анализируем ее в простейшем случае аксиальной симметрии. Проведенный анализ позволяет исследовать зависимость порогового значения магнитного числа Рейнольдса, с которого начинается мелкомасштабная генерация, от меры анизотропии поля скорости.

1. *Kazantsev A.P., SOVIET PHYSICS JETP Zh. Eksp. Tear. Fiz. 53, 1806-1813, 1967*
2. *С.А.Молчанов, А.А. Рузмайкин, Д.Д. Соколов, УФН, 1985, 145*

ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУКТУРЫ И ОБЪЕМНЫЕ СЕТИ КАНАЛОВ, КАК СОСТАВЛЯЮЩИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО МЕХАНИЗМА ИНИЦИАЦИИ МОЛНИИ В ГРОЗОВЫХ ОБЛАКАХ

Костинский А.Ю.[1]

[1]*МИЭМ НИУ ВШЭ, г. Москва* kostinsky@gmail.com

Основной нерешенной проблемой физики молнии остается проблема инициации молнии в грозовых облаках. Частью проблемы инициации молнии является вопрос: какова цепочка плазменных преобразований, которая начинается с газоразрядных лавин и оканчивается большим отрицательным лидером, наблюдаемым наземными приборами?

Мы представим результаты экспериментов по инициации необычных плазменных образований (unusual plasma formations — UPFs) внутри искусственного облака заряженного водного аэрозоля, как спонтанно, так и инициированных движущимися протяженными металлическими объектами, а также представим гипотезу о возможном месте необычных плазменных образований в последовательности плазменных процессов инициации внутриоблачных разрядов и молнии.